



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**TIEVÄYLIEN PÄÄLLYSTYÖKONEIDEN
OHJAUS SUHTEELLISESSA
KOORDINAATISTOSSA**

Mikko Ailisto

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2019



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**TIEVÄYLIEN PÄÄLLYSTYSTYÖKONEIDEN
OHJAUS SUHTEELLISESSA
KOORDINAATISTOSSA**

Mikko Ailisto

Ohjaajat: Rauno Heikkilä, Markku Pienimäki

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2019

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Ailisto, Mikko		Työn ohjaaja yliopistolla Heikkilä R, professori	
Työn nimi Tieväylien päällystystyökoneiden ohjaus suhteellisessa koordinaatistossa			
Opintosuunta Vesi- ja yhdyksuntatekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Maaliskuu 2019	Sivumäärä 85 s., 1 liite
Tiivistelmä <p>Diplomityön tavoitteena oli tutkia ja kehittää päällystystyökoneiden ohjausta suhteellisessa koordinaatistossa. Suhteellisessa ohjauksessa työkoneen työstöterän pystysuuntaista asemaa ohjataan suhteessa referenssipintaan, esimerkiksi nykyiseen tien pintaan. Absoluutisessa 3D-ohjauksessa työstöterän pystysuuntainen asema ohjataan koneohjausmallin mukaiseen globaaliin korkeusasemaan. Työssä tutkittiin suhteellisen menetelmän tarkkuutta ja taloudellisuutta sekä kehitettiin siihen soveltuva koneohjausmenetelmää.</p> <p>Menetelmän tarkkuutta eri vaiheissa tutkittiin toteutetuista päällystyskohteista mitattujen toteumatietojen, kirjallisuuslähteiden sekä asiantuntijahaastattelujen kautta. Taloudellisuutta selvitettiin toteutuneiden päällysteen korjauskohteiden kustannustietojen avulla ja haastatteleamalla mittauspalveluiden tuottajia, mittalaite- ja koneohjausjärjestelmien myyjiä, suunnittelijaa ja urakoitsijaa. Menetelmään soveltuvan koneohjausmallin kehittäminen toteutettiin Finnmap Infra Oy:n suunnittelijoiden kanssa työpajamuotoisesti, asiantuntijahaastatteluilla ja kirjallisuuteen perehtymällä.</p> <p>Laskennallisen tarkastelun perusteella tienpinnan toleranssivaatimukset voidaan saavuttaa suhteellisella ohjausmenetelmällä. Vain pilottikohteesta kerätystä toteumatiedosta voi arvioida todellista tarkkuutta.</p> <p>Toteutuksen kustannustehokkuus on tarkastellussa menetelmässä hyvä, kun sitä verrataan 3D-koneohjausmenetelmään sekä ilman automaattista koneohjausta toteutettavaan päällysteen korjaukseen. Erityisesti perinteiseen massatasaukseen verrattuna menetelmällä voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä pienentyneiden tasausmassamäärien vuoksi. Mobiililaserkeilauksen suorittaminen ilman signalointia tuottaa myös kustannussäästöjä absoluuttiseen 3D-koneohjaukseen verrattuna. Pinnasta ohjaavan suhteellisen menetelmän toteutuskustannukset ovat opastavaa koneohjausta korkeammat. Lopputuloksen eli tienpinnan geometrinen tarkkuus ja sitä kautta saavutettu ajomukavuus liikennekäytössä on parempi.</p> <p>Suhteelliseen ohjausmenetelmään kehitetty koneohjausmalli lisää hieman suunnittelijan työ määrää verrattuna absoluutisessa 3D-koneohjauksessa tuotettavaan malliin. Suunnittelujärjestelmään luotavien automaattisen toimintojen myötä lisätyöpanoksen määrä on kuitenkin merkityksetön. Kehitetyllä koneohjausmenetelmällä voidaan pienentää koneohjausjärjestelmän tien poikkisuuntaisten paikannusvirheiden aiheuttamia korkeuspoikkeamia.</p> <p>Suhteellista ohjausmenetelmää kannattaa seuraavaksi kokeilla pilottihankkeissa, joissa tavoitteina voisivat olla ohjaustarkkuuden ja kustannustehokkuuden tässä tutkimuksessa arvioitujen tietojen varmentaminen todellisilla toteumatiedoilla. Työn ohessa laadittiin ehdotus Buildingsmart Finlandin Yleisten inframallivaatimusten ohjeen 11.2 päivittämiseksi.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Degree Programme in Environmental Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Ailisto, Mikko		Thesis Supervisor Heikkilä R, professor	
Title of Thesis Control of highway paving in relative coordinate system			
Major Subject Water and Civil engineering	Type of Thesis Master's thesis	Submission Date March 2019	Number of Pages 85 p., 1 App.
Abstract <p>The aim of the master's thesis was to research and develop the control of highway paving machines in a relative coordinate system. In the relative control the machine's tool (milling drum/screed) upward position is controlled in relation to a reference surface, for example an existing paved surface. In absolute 3D control the machine tool's upward position is aligned according to the machine control model's global elevation. The accuracy and economy of the method was researched, and a suitable machine control model was developed.</p> <p>The accuracy of the method in different phases was evaluated by researching measurement data from actual paving projects, literary sources and interviewing experts. Economic efficiency was examined using data from actual projects and by interviewing measurement service providers, measuring device and machine control system salespersons, as well as a designer and a contractor. The development of a suitable machine control model for the method was executed with Finnmap Infra Oy's designers in a workshop as well as by interviewing experts and conducting literary review.</p> <p>The results from the research proved that with the relative control method the tolerances for slope and elevation set by the client are met. However, only data gathered from a pilot project will provide information about the actual achievable accuracy.</p> <p>The economy of paving using the method is good in comparison to the 3D machine control method and pavement repair without machine control. Especially when compared to the traditional method, the savings are significant because of the lower volume of the levelling mix required. The utilisation of mobile laser scanning without control points brings significant savings when compared to 3D machine control. Relative control method's paving expenses are higher than those in guiding machine control. The quality of the road surface is better which results in a more comfortable driving experience.</p> <p>The machine control model developed for the relative control method includes some additional work for the designer when compared to the model produced in 3D machine control. However, by creating automatic functions in the design system, the amount of additional work input is negligible. It is possible to mitigate the effects of inaccurate localization in the machine control system with the developed machine control model.</p> <p>Relative control method should be tested in pilot projects, where the research aims could be the confirmation of the control accuracy and the economy with actual data which were evaluated in this thesis. In addition to the research, a proposal for the update of Buildingsmart Finland's Common InfraBIM Requirements guide 11.2 was made.</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Diplomityön tarkoituksena oli kehittää päällystystyökoneiden ohjausta suhteellisessa koordinaatistossa. Työn ohjaajina toimivat professori Rauno Heikkilä Oulun yliopistosta ja DI Markku Pienimäki Finnmap Infra Oy:stä. Lisäksi diplomityön ohjausryhmään kuuluivat Katri Eskola Väylävirastosta, Tuomas Vasama Uudenmaan ELY-keskuksesta, Manu Marttinen NCC Industry Oy:stä, Petri Niemi Finnmap Infra Oy:stä, Kalle Mulari Novatron Oy:stä ja Ari Tulus Wirtgen Finland Oy:stä. Diplomityön tilaajana toimi Väylävirasto, joka yhdessä Finnmap Infra Oy:n kanssa vastasi työn rahoituksesta.

Kiitän kaikkia ohjausryhmän jäseniä rakentavista kommentteista ja muusta avusta työn aikana. Erityisesti kiitän Rauno Heikkilää, joka kannusti kriittiseen ajatteluun tutkimustyössäni. Kiitos Markku Pienimäelle, Manu Marttiselle ja Petri Niemelle kärsivällisestä opastuksesta läpi työn. Erityiskiitos myös Katri Eskolalle työn rahoituksen järjestämisestä. Sain apua useilta ohjausryhmän ulkopuolisilta asiantuntijoilta, joille osoitan myös kiitokseni. Kiitän etenkin Janne Paitsolaa SITECH Finlandilta kaikesta jakamastaan asiantuntemuksesta.

Kiitos Janne Jääskälle lukemattomista hauskoista hetkistä yliopistolla ja kannustuksesta diplomityön teossa. Vanhemmilleni olen kiitollinen kaikesta tuesta pitkän opinpolkuni aikana.

Helsingissä, 28.3.2019 Mikko Ailisto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	9
1.1 Tieväylien päällysteiden korjaus perinteisesti	10
1.2 Päällystystyökoneiden koneohjaus.....	13
1.3 Tietomallipohjainen päällystystyö	20
1.3.1 Opastava koneohjaus	21
1.3.2 Automaattinen koneohjaus	32
1.4 Nykyisten menetelmien haasteet ja ongelmat	35
1.5 Tavoite.....	36
2 TIEVÄYLIEN PÄÄLLYSTYSTYÖKONEIDEN OHJAUS SUHTEELLISESSA KOORDINAATISTOSSA	38
2.1 Suhteellinen ohjausmenetelmä ja osavaiheet	38
2.1.1 Lähtötiedot ja niiden käsittely	38
2.1.2 Suunnittelu.....	38
2.1.3 Toteutus	39
2.1.4 Laadunvarmistus.....	42
2.1.5 Satunnaisvirheiden lähteet	42
2.2 Empiiriset kokeet ja havainnoinnit.....	46
2.2.1 Ohjausmenetelmän satunnaisvirheiden selvittäminen.....	46
2.2.2 Ohjausmenetelmän taloudellisuuden selvittäminen	49
2.2.3 Ohjausmenetelmään soveltuvan koneohjausmallin kehitys	50
3 TULOKSET	51
3.1 Laskennalliset tarkkuudet eri vaiheissa.....	51
3.2 Taloudellisuuden tarkastelun tulokset.....	53
3.3 Koneohjausmallin kehittämisen tulokset	59
3.3.1 Eromalli-menetelmä	59
3.3.2 Osamalli-menetelmä	60
4 PÄÄTELMÄT	65
4.1 Saavutetun tarkkuuden riittävyys	65
4.2 Ohjausmenetelmän taloudellisuus.....	68
4.3 Koneohjausmallin tuottamisen arviointi	69

4.4 Jatkotutkimus- ja kehitysehdotukset	70
LÄHDELUETTELO	73

LIITE:

Liite 1. Ehdotus YIV-ohjeeseen 11.2. tehtävistä päivityksistä.

MERKINNÄT JA LYHENTEET

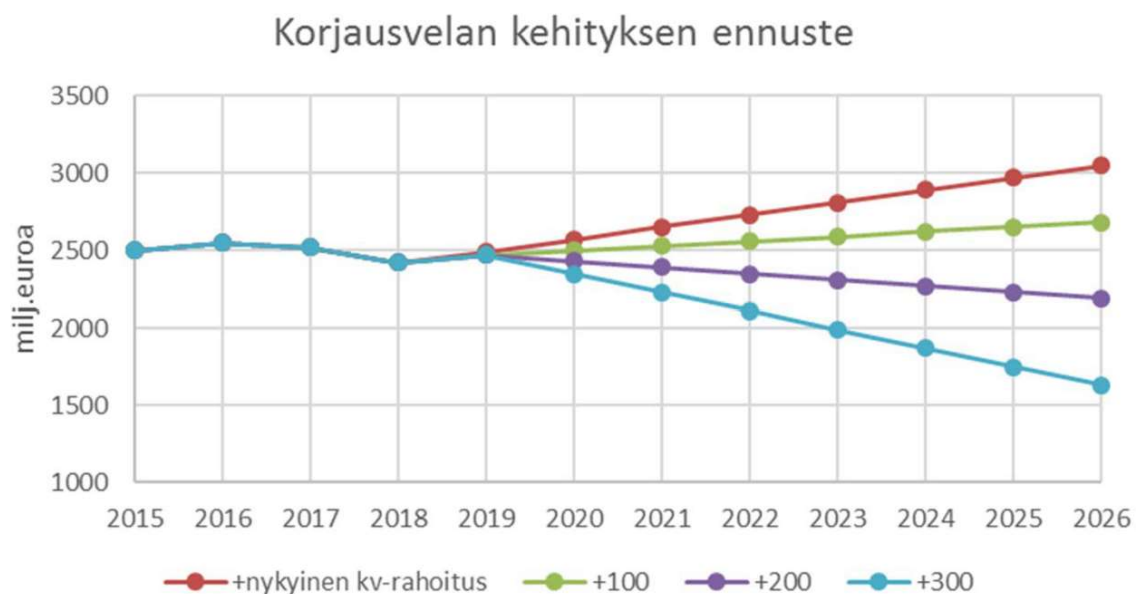
BIM	Building information model
CAD	Computer Aided Design
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DOP	Dilution of Precision
GNSS	Global Navigation Satellite System
Hz	Hertsi
IMU	Inertial Measurement Unit
IRI	International Roughness Index
PPL	Pudotuspainolaite
PTM	Palvelutasomittaus
RTK	Real time kinematic
TSD	Traffic Speed Deflectometer
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VRS	Virtual Reference Station
YIV	Yleiset inframallivaatimukset

1 JOHDANTO

Liikenneviraston tekemän ennusteen mukaan henkilö- ja tavaraliikenteen kuljetussuoritteiden arvioidaan kasvavan 67 miljardiin ajoneuvokilometriin vuoteen 2030 mennessä, mikä on 23 % enemmän kuin vuonna 2012. Huolimatta ennusteeseen liittyvistä useista epävarmuustekijöistä (esimerkiksi talouden kehittyminen, liikkumistottumusten muutokset, uudet ajoneuvoteknologiat), on liikennemäärien kasvua edessä, ja sen myötä teihin kohdistuva kuormitus tulee lisääntymään. (Ristikartano et al. 2014, s. 3-4)

Liikennemäärän kasvu vaikuttaa tieväylien korjausvelkaan. Korjausvelka on summa kustannuksista, jotka muodostuisivat valtio-omisteisen väyläomaisuuden korjaamisesta tavoitteen mukaiseen kuntoon. Suomessa liikenneväylien korjausvelka oli vuoden 2017 alussa 2,5 miljardia euroa. Summasta tieväylien osuus oli 1,3 miljardia euroa, josta 80% kuului teiden päällysteiden ja rakenteiden korjaustarpeisiin. (Dietrich et al. 2017, s. 12 & 18)

Aikaisempien vuosien niukan tienpidon rahoituksen vuoksi Suomen väyläverkko on rapistunut merkittävästi, minkä vuoksi Sipilän I hallituksen kärkihankkeisiin kuului korjausvelan pienentäminen (Liikennevirasto 2017, s. 4). Korjausvelkaohjelmassa liikenneväylien parantamiseen osoitettiin 600 miljoonaa lisärahoitusta vuosille 2016–2018, minkä johdosta korjausvelan kasvu taittui vuonna 2017 (kuva 1).



Kuva 1. Liikenneväylien korjausvelan kasvuennuste (Karjalainen 2018, s. 9).

Rahoituksesta jyvitettiin noin 35 miljoonan euron osuus erilaisille liikenneväylien digitalisaation ja uusien palvelujen kehittämiseksi (Liikennevirasto 2017, s. 4). Osana tätä niin kutsuttua digitalisaatiohanketta Liikennevirasto ja yritykset ovat pyrkineet kehittämään tien päällystystöiden suunnittelu- ja toteutusprosesseja, jotta teiden kunnossapitoon osoitettu rahoitus saadaan tehokkaammin käytettyä ja lopputuotteen laatua parannettua (Eskola 2017).

Korjausvelan kasvun lisäksi uusien innovaatioiden kysyntää nostavat kasvihuonekaasujen supistamisen tarve, sillä asfaltin valmistus ja päällystystyöt ovat energia- ja kasvihuonekaasuintensivistä toimintaa (Pasanen & Miilumäki 2017, s. 10). Liikenneviraston selvityksen mukaan tietomallintamisen ja infrastruktuurin rakentamisen automaatiolla saavutetaan energiatehokkuuden parantamista (Liikennevirasto 2016, s. 51).

Tieväylien kunnossapidon menetelmiä on selkeä tarve kehittää, jotta kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää ja korjausvelkaa saadaan lyhennettyä tai edes pidettyä velan kasvu kohtuullisena myös tulevaisuudessa, niukemman rahoituksen aikana. Kustannustehokkuuden lisäämiseksi on kehitetty päällysteen korjauksen menetelmiä, jotka pohjautuvat tietomalleihin ja koneohjaustoteutukseen. Muun muassa yhdessä Liikenneviraston digitalisaatiohankkeen pilotissa hyödynnettiin näitä verrattain uusia menettelytapoja (Asfalttikallio 2017, Vasama 2017). Nykyinen kehitystyö on jatkoa FINBIM-kehitysohjelmaan sisältyneeseen MAINTENANCE BIM -projektiin (2011-2014).

1.1 Tieväylien päällysteiden korjaus perinteisesti

Päällystystyökoneet ovat tien päällystekerroksen rakentamisessa tai korjauksessa käytettäviä työkoneita. Suomessa käytetään myös yleisesti termiä asfalttikoneet, sillä suomalaisten tieväylien sidottu päällyste tehdään lähes poikkeuksetta jostain asfalttityypistä (esimerkiksi asfalttibetonista). Myös betonipäällysteitä on kokeiltu Suomessa, mutta testikohteista saadut kokemukset eivät kannustaneet niiden laajemmalle hyödyntämiselle (Tekniikka & Talous 2006). Päällystystyökoneilla tässä yhteydessä tarkoitetaan asfalttijyrsimiä, asfaltinlevittäjiä ja tiejyriä.

Asfalttijyrsimiä käytetään päällysteiden korjaukseen. Jyrsimen toiminta perustuu pyörivään jyrsinrumpuun, jonka pinnalla olevat jyrsinpiikit rikkovat päällysteen. Syntyvä jyrsinrouhe ja -pöly kerätään pois jyrsityltä päällysteeltä ja ohjataan työkonen edessä kulkeviin rouheenkuljetusautoihin. Jyrsinrummun leveys ja jyrsinpiikkien tiheys valitaan jyrsittävän kohteen perusteella. (PANK ry 2018c, s. 5; Wirtgen GmbH 2016)

Asfaltinlevittimiä käytetään uusien teiden päällysteen rakentamiseen ja vanhojen korjaukseen. Levittimen etuosan vastaanottosiiloon syötetään asfalttimassa, joka kulkeutuu koneen peräosaan siirtolaitteiston avulla. Varsinaisen asfalttimassan levityksen ja esitiivistyksen tekee palkki, jonka korkeusasemaa ja kallistusta säädetään hydraulikan avulla. Palkki voi olla portaattomasti levennettävä (”zoom-palkki”) tai kiinteä, jolloin palkkia levitetään siihen asennettavilla lisäkappaleilla. (PANK ry 2018a, s. 1-3)

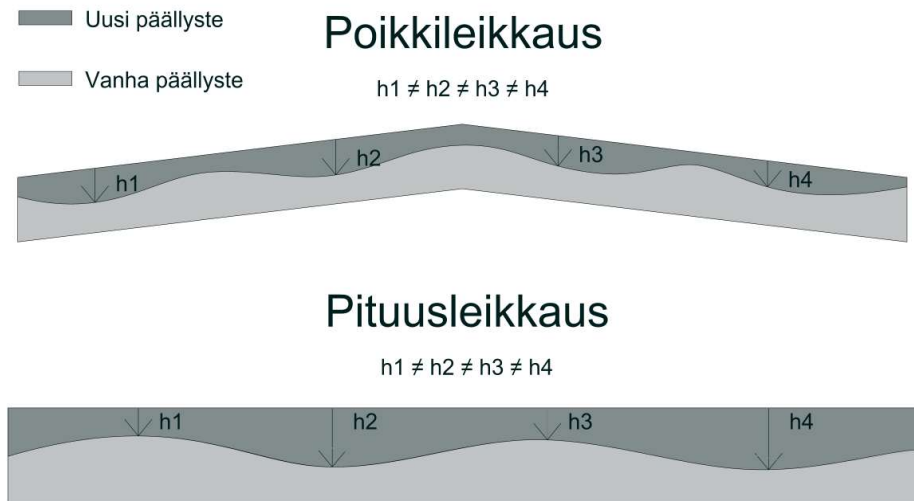
Tiejyrrällä tiivistetään asfalttimassaa levityksen jälkeen. Tiivistämisen tarpeet ja kohteen asettamat rajoitukset vaihtelevat suuresti, joten myös erilaisia jyrätyyppejä on lukuisia. Tiejyrien tiivistäminen perustuu kuitenkin aina sylinterinmuotoiseen telaan, joka joko staattisesti tai dynaamisesti tiivistää asfalttia. Staattinen tiivistäminen perustuu pelkästään painosylinterin massaan (staattinen valssijyrä), dynaamisessa tiivistämisessä hyödynnetään myös iskuvoimaa (täryjyrä). (PANK ry 2018b, s. 1-8)

Päällysteiden korjaustarvetta aiheuttavat (Liikennevirasto 2017, s. 23):

- kulumisesta aiheutuva urautuminen
- deformaatiosta aiheutuva urautuminen
- tien pinnan epätasaisuus
- liikennekuormituksen aiheuttamat halkeamat
- roudan aiheuttamat halkeamat ja heitot
- pintavauriot
- reunapainuma
- puutteellinen tai väärä sivukaltevuus
- puutteellinen kantavuus
- kuivatuksen puutteiden aiheuttama kantavuuden heikkeneminen
- liian vähäinen kitka
- päällysteen meluisuus

Perinteinen päällysteiden korjaus on yksinkertaisimmillaan ja useimmiten tehty massapintauksella (MP), jossa levitetään uusi päällyste (AB, PAB) urautuneen tai muuten

vaurioituneen päällysteen päälle (Liikennevirasto 2017, s. 49). Uuden päällysteen paksuus vaihtelee vanhaa päällystettä mukaillen (kuva 2). Menetelmällä korjataan ainoastaan päällysteeseen muodostuneita uria, reikiä ja muita selkeitä vaurioita, mutta ei tien geometriaan liittyviä ongelmia. Menetelmän heikkoutena on myös se, että uuteen päällysteeseen muodostuu suhteellisen nopeasti vanhan päällysteen urat ja painumat.



Kuva 2. Massapinta.

Vakiopaksuinen päällyste (LTA) -menetelmässä levitetään tasapaksu asfalttilaatta alustalle, joka on etukäteen tasattu tasausjyrsinnällä (TJYR) tai massatasauksella (TAS). Ne ovat päällystystyössä sidotun alustan esikäsittelymenetelmiä, jotka ovat edellytykset vakiopaksuisen päällystelaatan levittämiseen (Liikennevirasto 2017, s. 45-46). Tasausjyrsinnässä tie tai katu jyrsitään koko poikkileveydeltään urien pohjaan asti ja siten luodaan uusi, uraton tieprofiili (Lemminkäinen 2017, s. 30; NCC 2018). Massatasauksessa tien urat ja epätasaisuudet tasataan päällystemassalla, joka on suunnitelmassa esitettyä tai samaa kuin varsinaisessa päällystyksessä käytettävä (Liikennevirasto 2017, s. 48). Massatasaus on tasausjyrsintää huomattavasti kalliimpaa, joten on kustannustehokasta optimoida päällysteenkorjaus siten, että tasausjyrsintää maksimoidaan ja massatasaus minimoidaan. (NCC Suomi Oy 2018)

Muita päällysteen korjausmenetelmiä ovat (Liikennevirasto 2017, s. 49-61):

- massatasaus kuumajyrsitylle alustalle
- remix (REM) -menetelmät
- uraremix- ja uraremo-menetelmät (urapaikkaukset)
- sirotepinta- / -paikkaus

- hienojyrsintä

Perinteisissä päällysten korjausmenetelmissä suunnittelu perustuu yleensä tierekisteristä saataviin tietoihin. Erilliset mittaukset suunnittelua varten ovat harvinaisia perinteisissä menetelmissä, mutta joskus saatetaan tehdä takymetri- tai muita mittauksia kohteella ennen päällystystyön toteutusta. (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 7.1.2019, haastattelu)

1.2 Päällystystyökoneiden koneohjaus

Päällystystyökoneiden, kuten muidenkin työkoneiden (esimerkiksi kaivukone), ohjausjärjestelmä voidaan jakaa perusjärjestelmään ja sen päälle erikseen asennettavaan 3D-järjestelmään. Perusjärjestelmä osoittaa työkoneen työstöterän asennon ja sijainnin, 3D-järjestelmä tuottaa työkoneen paikkatietoa globaalissa koordinaatistossa ja poikkeamatietoa 3D-mallin perusteella (Heikkilä & Jaakkola 2004, s. 29). Heikkilän (2018) mukaan 3D-koneohjausjärjestelmät voidaan jakaa automaation ohjaustason mukaan neljään ryhmään (taulukko 1).

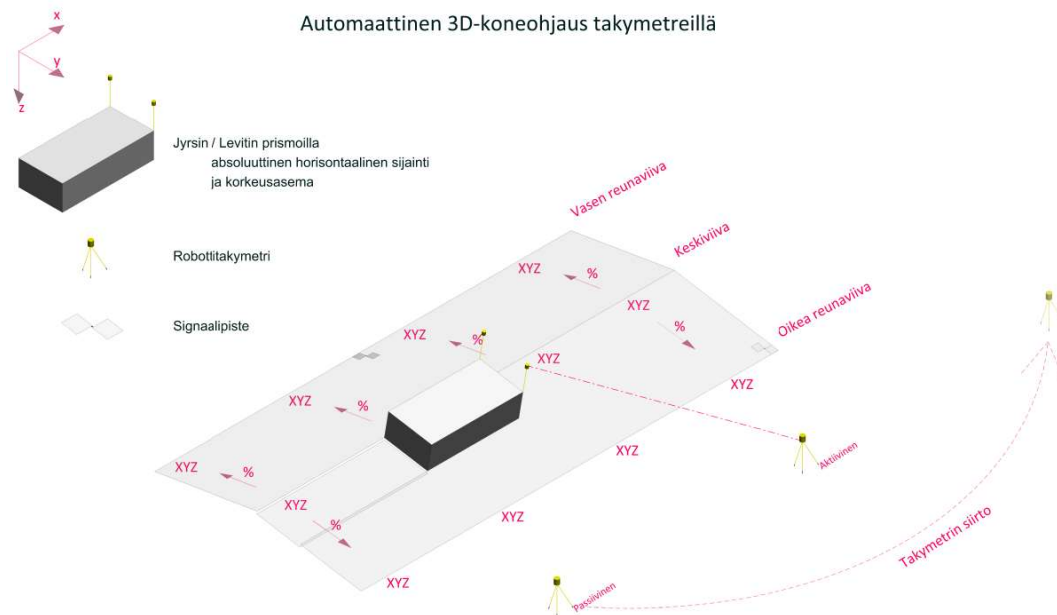
Taulukko 1. Automaattisten 3D-koneohjausjärjestelmien ryhmittely automaatioasteen mukaan (Heikkilä 2018; VTT 2004, s. 16)

Automaatioaste	Ominaisuudet	Esimerkki
Opastava	Koneenkuljettaja siirtää työkonetta ja ohjaa työstöterää manuaalisesti tietokonenäytön informaation perusteella	Kaivukoneen kaivussyvyyden näyttölaite
Koordinoiva	Kuljettaja siirtelee työkonetta ja ohjaa työstöterää manuaalisesti käänteiskinematiikan avustamana ("Joy stick"-ohjaus)	Tiehöylän terän hallinta
Ohjaava	Kuljettaja siirtelee työkonetta ja ohjaa osaa työstöterän liikkeistä manuaalisesti järjestelmän ajaessa automaattisesti osaa liikkeistä	Jyrsinrummun työstösyvyyden ja sivukaltevuuden automaattinen ohjaus
Autonominen	Toimii ilman kuljettajaa	Kuorma-auton automaattinen lastaus

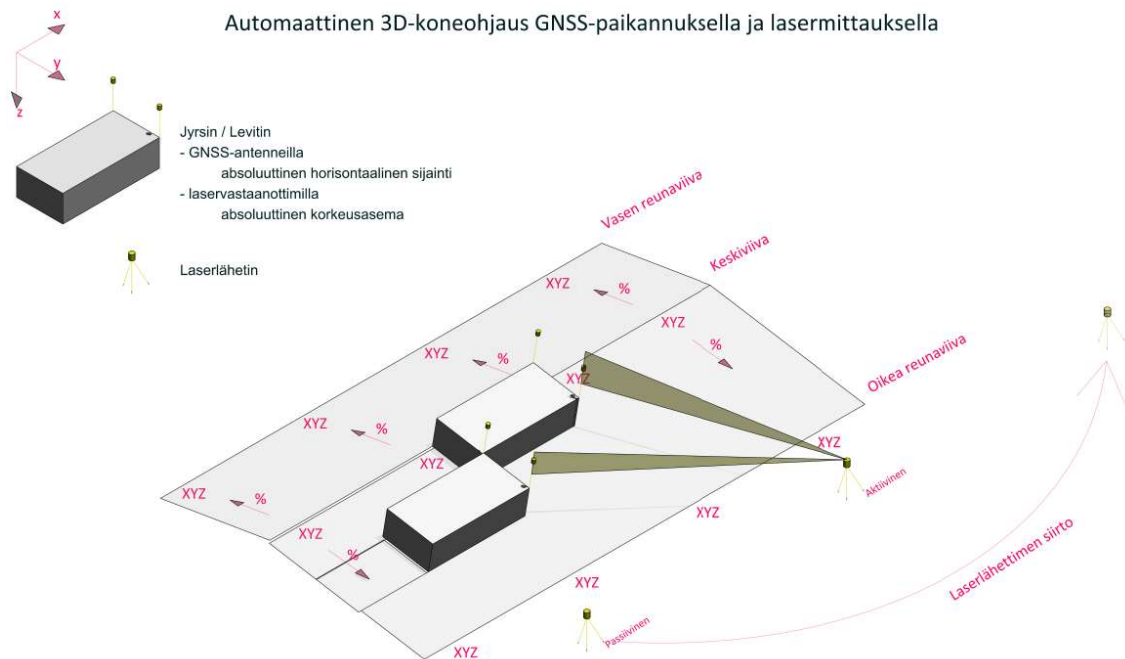
Suomessa päällystystyökoneiden 3D-koneohjauksessa on hyödynnetty opastavaa ja ohjaavaa koneohjausta. Opastava koneohjaus toteutetaan tyypillisesti tiehen tehdyillä maalimerkinnöistä tai digitaalisen mallin avulla. Maalimerkintä-menettelyssä koneenkuljettaja lukee jyrsintä- ja tasaussyvyydet sekä sivukaltevuudet

maalimerkinnöistä ja pyrkii ohjaamaan työkonetta niiden mukaisesti. Digitaalisessa menettelyssä koneenkuljettaja lukee ohjausarvot taulutietokoneelta (“tabletilta”) tai joltain muulta mobiililaitteelta, jossa on GNSS-vastaanotin. Päällystystyökoneeseen ei opastavassa koneohjauksessa asenneta erillistä 3D-koneohjausjärjestelmää. (Marttinen & Pienimäki 2015, 32-33)

Ohjaavassa koneohjauksessa koneenkuljettaja ohjaa työkonetta oikean ajolinjan mukaisesti, mutta koneohjausjärjestelmä säättää automaattisesti jyrsinrummun tai levittimen ohjauspalkin korkeusaseman ja kaltevuuden. Horisontaalinen paikannus perustuu robottitakymetri- tai RTK-GNSS-mittaukseen. Absoluuttisessa 3D-koneohjauksessa korkeusasema voidaan määrittää robottitakymetrillä (kuva 3), RTK-GNSS:llä tai lasermittauksella (kuva 4). Tieväylien 3D-koneohjauksessa tarvitaan vähintään kaksi robottitakymetriä/laserlähettintä: toinen ohjaa työkonetta, kun toista siirretään seuraavaan kojeasemapaikkaan (kuva 3 & 4). Takymetrimittauksen tarkkuuteen vaikuttaa etäisyys prismaan, minkä vuoksi päällystystöiden koneohjauksessa maksimietäisyytenä takymetrin ja prisman (työkoneen) välillä on ollut 150 – 200 metriä (Marttinen & Heikkilä 2014, s. 23; M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 26.3.2019, sähköpostikeskustelu; V.-M. Tanhuanpää, market segment manager, & J. Kokko, asiantuntija, 10.1.2019, haastattelu). Jos korkeusaseman suhteen toimitaan suhteellisessa koordinaatistossa, etäisyyden mittaus perustuu ultraääniantureihin tai laserskannereihin (VTT 2004, s. 19).



Kuva 3. Robottitakymetreihin perustuva 3D-koneohjaus. Yksi robottitakymetri voi ohjata vain yhtä työkonetta.



Kuva 4. GNSS-paikannukseen ja lasermittaukseen perustuva 3D-koneohjaus. Yksi laserlähetin voi ohjata useampaa työkonetta.

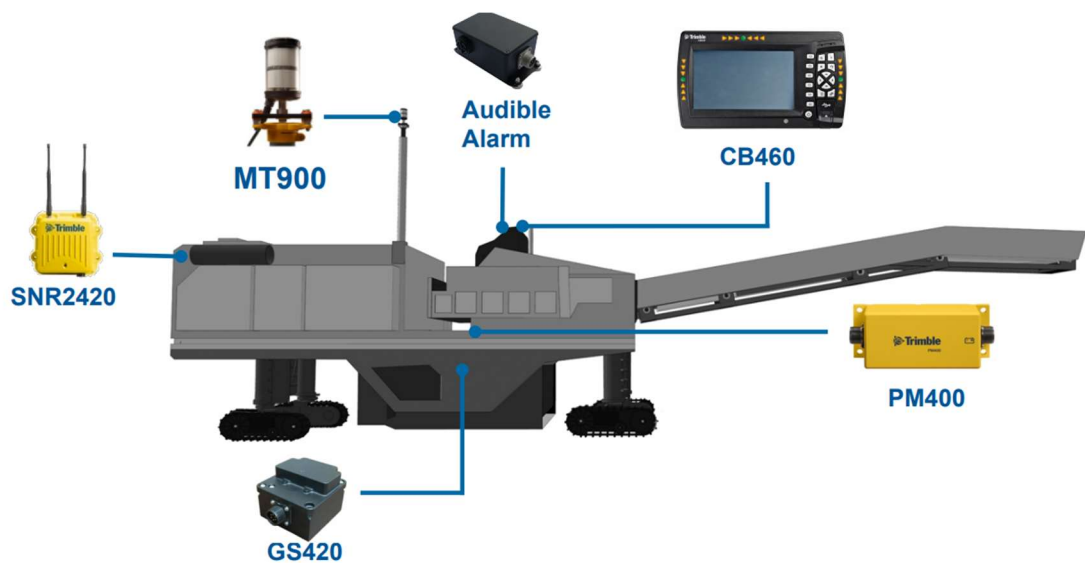
3D-koneohjausjärjestelmien lisäksi päällystystyökoneisiin on saatavilla erillisiä 2D-järjestelmiä, joiden ohjaus perustuu ultraääniantureihin. Anturit mittaavat jyrsinrummun tai ohjauspalkin etäisyyden referenssipinnasta, joka voi olla esimerkiksi linjalanka, reunakiveys tai nykyinen tien pinta (Topcon Positioning Systems, Inc. 2019f).

Päällystystyökoneiden 2D-järjestelmät eivät hyödynnä paikannustietoa tai 3D-koneohjausmalleja.

Suksi-menetelmässä ultraäänianturit käyttävät referenssinä nykyistä tien pinta. Pitkät, monesti päällystystyökonetta pitemmät, sukset tuottavat tietoa tien nykypinnasta koneohjausjärjestelmälle. Järjestelmä laskee uuden, tasaisen pinnan (virtuaalinen referenssipinta) suhteellisen etäisyyden nykypinnasta siten, että tien epätasaisuudet saadaan poistettua suksen pituutta vastaavalta matkalta/aallonpituudelta. Esimerkiksi MOBA myy tuotenimellä Big Sonic-Ski 13 metriin asti pidennettävää suksea, joka voidaan asentaa asfaltinlevittimiin (MOBA Mobile Automation AG 2013).

Suurimmat koneohjausjärjestelmien valmistajat ovat Trimble Inc., Leica Geosystems AG, Topcon Positioning Systems Inc. ja MOBA GmbH (Hokkanen 2012, s. 13). Näistä kaikki paitsi MOBA GmbH tarjoaa 3D-koneohjausjärjestelmiä asfalttikoneisiin.

Trimblen jyrsin- ja levityskoneille kehittämä 3D-koneohjausjärjestelmä perustuu takymetrimittaukseen. PCS900-tuotenimellä myytävä järjestelmä (kuva 5) koostuu tietokoneyksiköstä, yhdestä tai kahdesta aktiiviprismasta, IMU-laitteesta (Inertial measurement unit) ja radiovastaanottimesta (takymetrille). Lisäksi järjestelmään on saatavilla hälytin, joka ilmoittaa asfalttiryhmälle koneohjaukseen liittyvistä ongelmista. (Trimble Inc. 2013c)



Kuva 5. PCS900-järjestelmä jyrsimessä. Versio 2.1. (Trimble Inc. 2013c)

Takymetriin perustuvan 3D-ohjauksen lisäksi Trimblellä on harkittu automaattista koneohjausjärjestelmää, joka perustuisi suhteelliseen ohjaukseen. Yrityksen edustajan mukaan tällainen koneohjausjärjestelmä tullaan kehittämään hyvin todennäköisesti tulevaisuudessa. (K. Garcia, paving segment manager, 12.9.2018, sähköpostikeskustelu)

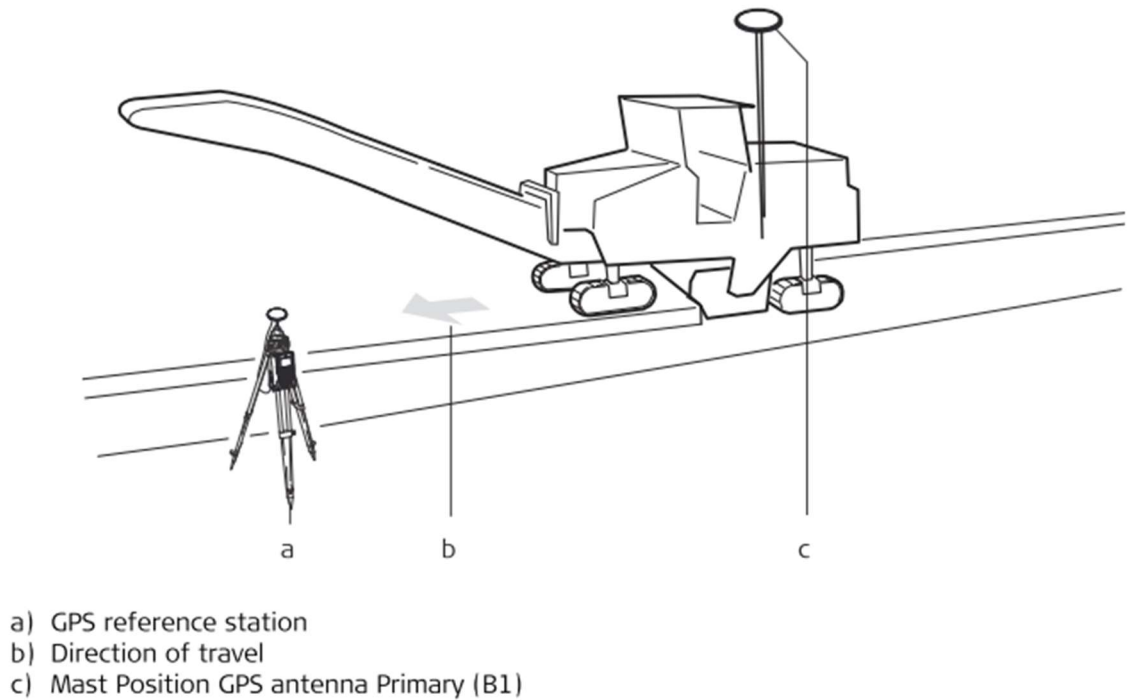
Topcon on ainoa suuri koneohjausjärjestelmien valmistaja, jolla on tien pinnasta ohjattua automaattista koneohjausta (tilanne vuonna 2018). Lisäksi se on ainoa, joka tarjoaa kokonaisvaltaista integroitua ratkaisua koneohjatulle päällysteen korjaukselle: Topconin päällystysprosessiin sisältyy mobiililaserkeilaus (lähtötietojen keräys), suunnittelu (Magnet Office: Resurfacing -ohjelmisto) ja koneohjausjärjestelmä asfalttikoneille. Smoothride-koneohjausjärjestelmä koostuu tietokoneyksiköstä, GNSS-antenneista ja -vastaanottimesta sekä ultraääniantureista. Optioina järjestelmään on saatavilla kaltevuusanturi ja Sitelink3D-yhteys työmaan hallintaa varten. (Topcon Positioning Systems, Inc. 2018a)

Topconin Smoothride-konseptissa korjaussuunnitelma ei ole suhteessa tien pintaan, vaan koneohjausjärjestelmälle toimitetaan suunniteltujen jyrshintä- ja tasauspintojen lisäksi mobiililaserkeilauksella tuotettu nykytilamalli. Ohjausjärjestelmä laskee suunnitelma- ja nykypinnan välisen erotuksen ja ohjaa jyrshinnän/levityksen suunnitelmapinnan korkeustasoon. (Topcon Positioning Systems, Inc. 2018b)

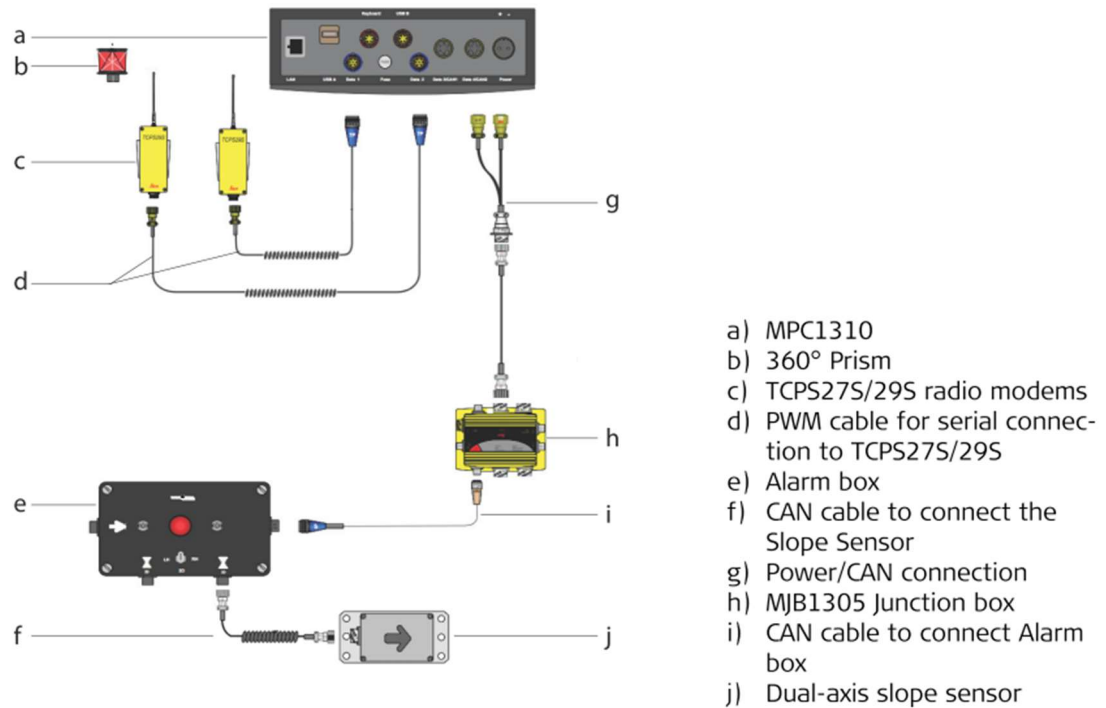
Topconin edellisen sukupolven 3D-järjestelmä perustui GNSS-paikannukseen (absoluuttinen horisontaalinen sijainti) ja lasermittaukseen (absoluuttinen korkeusasema). Järjestelmän laserlähetin ja -vastaanotin toimivat samalla periaatteella kuin robottitakymetri ja aktiiviprisma: laserlähettimen absoluuttinen korkeusasema on määritetty tarkkaan, jolloin taas laservastaanotin kykenee määrittämään oman korkeusasemansa tarkasti suhteessa lähettimeen. Laserlähetin lähettää vyöhykemuotoista lasersädettä, jota voi hyödyntää useampi työkonetyöskone yhtä aikaa. Muita osia ovat tietokoneyksikkö, kaltevuusanturi sekä RTK-GNSS-vastaanotin ja -antenni. (Topcon Positioning Systems, Inc. 2018b)

Leican koneohjausjärjestelmät asfalttikoneisiin (iCON Pave & iCON Milling) perustuvat robottitakymetriohjaukseen tai GNSS-paikannukseen. Järjestelmän hyödyntäessä takymetriohjausta toteutuksen periaate on sama kuin Trimblen takymetriin perustuvaa järjestelmää käytettäessä. Kun takymetriohjauksen sijaan hyödynnetään GNSS-vastaanotinta, niin asfalttikoneen horisontaalinen ja vertikaalinen paikannus perustuu

RTK-GNSS-paikannukseen (kuva 6). Tällöin paikannuksen ja sivukaltevuuden tarkkuus merkittävästi heikkenee verrattuna takymetriohjaukseen (taulukko 2). Ohjausjärjestelmän muita komponentteja ovat tietokoneyksikkö, radiomodeemit ja kaltevuusanturi prismamastolle (kuva 7). (Leica Geosystems AG 2013)



Kuva 6. Leica Pavesmart 3D -koneohjausjärjestelmän toimintaperiaate jyrsinkoneessa, kun hyödynnetään GNSS-paikannusta (Leica Geosystems AG 2013, s. 88).



Kuva 7. Leica Pavesmart 3D -koneohjausjärjestelmän komponentit Wirtgenin tai MOBAn jyrskoneisiin, kun käytössä on takymetriohjaus (Leica Geosystems AG 2013, s. 89).

Taulukko 2. Leica Pavesmart 3D -koneohjausjärjestelmän tarkkuus takymetriohjauksella ja GNSS-paikannuksella (Leica Geosystems AG 2013, s. 134).

Paikannusmenetelmä	Parametri	Tarkkuus*
Robottitakymetri	Korkeusasema	5–10 mm / 200 m etäisyydellä
	Horisontaalinen paikannus	5–10 mm / 200 m etäisyydellä
RTK-GNSS	Korkeusasema ja horisontaalinen paikannus	10–25 mm
*Tarkkuudet kuvaavat keskivirhettä optimaalisissa oloissa		

Hollantilainen Tyker Construction BV on tienrakentamisen robotiikkaan erikoistunut pienyritys, joka myy jyrskoneille suhteelliseen ohjauksen perustuvaa koneohjausjärjestelmää. Road profiler -tuotenimellä myytävä koneohjausjärjestelmä koostuu tietokoneyksiköstä ja näytöstä sekä RTK-GNSS-vastaanottimesta. Muilta osin järjestelmä hyödyntää jyrskoneen omia mittalaitteita (kaltevuus, työstösyvyys). (Tyker Construction BV 2018a-b)

1.3 Tietomallipohjainen päällystystyö

Tietomallipohjaisessa päällysteen korjauksessa optimoidaan päällystysten toimenpiteitä (tasaus/jyrsintä) siten, että tien turvallisuuden ja kunnon ylläpidon kannalta kriittisimmät kohdat tulee korjattua. Toimenpiteet kohdistetaan joko kohteelle haluttujen vaikutusten perusteella tai kokonaiskustannusten mukaan. (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 16)

Ensimmäiset BIM- eli mallipohjaiset päällystekorjauksen pilottiprojektit Suomessa toteutettiin vuonna 2012 MAINTENANCE BIM -projektin (2011–2014) yhteydessä. Projektissa kehitettiin teiden hoidon ja ylläpidon tietomallipohjaisia prosesseja ja otettiin niitä hallitusti käyttöön. Projektin tulokset on esitetty MAINTENANCE BIM 2011-2012 ja MAINTENANCE BIM 2013-2014 -tulosraporteissa sekä Liikenneviraston julkaisussa ”Kokemukset tietomallien hyödyntämisestä teiden ylläpidon suunnittelussa ja hankinnassa”. Tulosraporteissa sekä Liikenneviraston julkaisussa todettiin pilottikohteista saadut kokemukset lupaaviksi ja jatkokehitys tarpeelliseksi. (Heikkilä & Marttinen 2014; Heikkilä & Marttinen 2015; Arola et al. 2015)

Kansainvälisesti MAINTENANCE BIM -projektin tuloksia esiteltiin kahdessa ISARC (International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining) -konferenssipaperissa, joista ensimmäinen käsitteli yleisesti pilottikohteista saatuja kokemuksia ja vertaili automaattista 3D-koneohjattua menetelmää perinteiseen päällysteen korjaukseen. Vuoden 2015 artikkeli kävi läpi opastavalla koneohjauksella toteutettujen päällystyskohteiden kokemuksia. (Heikkilä & Marttinen, 2013; Marttinen & Heikkilä 2015)

MAINTENANCE BIM -projektista saatujen hyvien tuloksien myötä kehittämistä on jatkettu. Niemen tutkimuksessa (2015) tutkittiin päällystettyjen tieväylien mallipohjaista nykytilan analysointia ja korjaussuunnittelua sekä arvioitiin, millaisiin päällystyskohteisiin mallipohjaista suunnittelua ja koneohjausta kannattaa hyödyntää. Rajalan tutkimuksessa (2016) arvioitiin mobiililaserkeilauksen mahdollisuuksia päällystyskohteen nykytilan analysoimisessa.

Vuosien 2012–2018 kokemusten pohjalta on julkaistu kaksi YIV-ohjetta päällysteiden mallipohjaiseen korjaukseen. Ohjeet ovat kahdessa osassa:

- YIV2015 Osa 11.1 INFRAMALLINNUS PÄÄÄLLYSTEIDEN KORJAAMISESSA (Marttinen & Pienimäki 2015)

- YIV2018 Osa 11.2 ASFALTTIPÄÄLLYSTEIDEN GEOMETRIAPUUTTEIDEN TIETOMALLIPOHJAINEN KORJAUSHANKE (Marttinen 2018)

Ohjeessa 11.1 käydään läpi tietomallintamisen luomia mahdollisuuksia ja kokemuksia infran hallintaan liittyvissä tehtävissä sekä annetaan ohjeita tietomallipohjaiseen päällysteiden korjauksen suunnitteluun (Marttinen ja Pienimäki 2015, s. 5). Ohje 11.2 käy tarkemmin läpi geometriapuutteiden korjausprosessin ja sen tarkoitus on antaa tilaajille lisätietoa siitä, millaisiin geometriapuutteisiin tietomallipohjainen prosessi sopii parhaiten (Marttinen 2018, s. 5).

1.3.1 Opastava koneohjaus

Opastavassa koneohjauksessa jysintää ja tasausta ohjataan suhteessa olemassa olevaan tien pintaan. Tämän vuoksi absoluuttisesti tarkka korkeusasema ei ole kriittistä suunnittelun lähtötiedoissa.

Mallipohjaisessa päällysteen korjauksessa tarvitaan tarkkaa tietoa korjattavan tien tasaisuudesta, urista, heitoista, kaltevuuksista sekä rakenteesta. Tyypillisesti nämä tiedot kerätään mobiililaserkeilauksella ja maatulauksella (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 16). Mobiililaserkeilauksesta käytetään myös nimityksiä mobiilikartoitus ja ajoneuvolaserkeilaus (Leinonen et al. 2015, s. 9).

Mobiililaserkeilauksessa ajoneuvoon asennettu laserkeilain lähettää lasersäteitä, jotka heijastuvat takaisin keilaimen ilmaisimeen. Lähtö- ja paluulasersäteen eroja vertailemalla lasketaan mitatun pisteen etäisyys ja heijastavuusarvo (intensiteetti). Pisteen koordinaattien määrittäminen perustuu GNSS-vastaanottimen ja inertialaitteen mittaustietojen yhdistämiseen. (Geotrim Oy 2018; Kukko 2013, s. 27; Leirimaa 2015, s. 16)

Mobiililaserkeilaimella tuotettavan pistetiheyden tulee olla niin korkea, että korjaustyön suunnittelijalle voidaan luovuttaa luotettava noin 5 cm:n pistevälillä harvennettu pisteistö. Suunnittelijalle luovutetaan myös niin sanottu raakapisteistö, jota ei ole harvennettu. YIV-ohjeissa ei ole annettu vaatimusta laserkeilaimen mittaustiheydelle, mutta uusimpien mobiililaserkeilaimien mittaustiheys vaihtelee 600 – 2 000 kHz:n välillä, millä saavutetaan riittävä pistetiheys suunnittelun lähtötiedoksi (Trimble 2018a; Riegl 2019; Teledyne Optech 2019; 3D Laser Mapping 2018). Laserkeilaimien kehitys on ollut nopeaa ja niiden mittaus- sekä pistetiheydet ovat kasvaneet moninkertaisesti 2010-luvulla

(Pekkala 2015, s. 5-6; Glennie et al. 2013, s. 64). Esimerkiksi Trimblen MX2-mobiililaserkeilaimen mittaustiheys on 72 kHz, kun taas uudemman sukupolven MX9:n mittaustiheys on asetuksista riippuen 600 – 2 000 kHz. Pistetiheyteen vaikuttaa mittaustiheyden lisäksi laserkeilauksen aikainen ajonopeus. Esimerkiksi Streetmapper IV-laserkeilaimella (mittaustiheys 1 000 kHz) pistetiheys puolittuu ajonopeuden kaksinkertaistuessa (taulukko 3). Ajonopeus on kääntäen verrannollinen pistetiheyteen.

Taulukko 3. Streetmapper IV-laserkeilaimella saavutettava pistetiheys eri ajonopeuksilla 5 metrin mittausetäisyydeltä, kun käytössä on yksi laserkeilain (kahdella keilaimella pistetiheydet kaksinkertaistuvat) (3D Laser Mapping 2018).

Ajonopeus	25 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h	100 km/h
Pistetiheys	4 800 / m ²	3 000 / m ²	2 000 / m ²	1 500 / m ²	1 200 / m ²

Pistepilvi muodostaa laserkeilatun ympäristön 3D-mallin, jossa jokaisella pistepilven pisteellä on koordinaatit ja intensiteetti (Geotrim Oy 2018). Pisteiden tarkkuus absoluuttisessa koordinaatistossa riippuu käytetyistä paikannusmenetelmistä ja mobiililaserkeilauksen jälkeiseen pistepilveen tehtävästä käsittelystä. Mobiililaserkeilauksen toteutustavat voidaan jakaa seuraavasti (Leinonen et al. 2015, s. 19-21; L. Hartikainen, toimitusjohtaja, 29.1.2019):

- Yksinkertaisimmassa menetelmässä eli signaloimattomassa mittauksessa pistepilven tarkkuus perustuu laserkeilauksen aikana suoritettavaan GNSS-paikannukseen sekä sitä tukevien IMU- (Inertial Measurement Unit) ja DMI-mittauksiin (Distance Measurement Instrument). Mitatulle pistepilvelle tehdään jälkilaskenta, jossa GNSS-vastaanottimen, IMU- ja DMI-mittausten tiedot yhdistetään. Sijaintitietoa tarkennetaan GNSS-tukiasemaverkosta (esim. Finnref) saatavan korjausdatan avulla.
- Tukiasemamittauksessa hyödynnetään RTK-GNSS-paikannusmenetelmää, missä mitattavalle tielle on tietyn välein asetettu paikannuksen korjauskoodia reaaliaikaisesti lähettäviä tukiasemia. Jälkikäsittelyssä pistepilvelle lasketaan absoluuttisesti tarkka sijainti RTK-tukiasemilta saadun korjausdatan avulla.
- Signaloidussa mittauksessa hyödynnetään laserkeilaimen paikannuslaitteiden ja virtuaalisten tai fyysisten RTK-tukiasemien korjaustietojen lisäksi referenssipisteitä, joiden sijainti tunnetaan erittäin tarkasti. Referenssipisteiden tarkka sijainti mitataan joko takymetrillä tai tarkkavaaituksella ja RTK-GNSS:llä. Varsinainen signaali tai signaalikuvio muodostuu referenssipisteen ympärille maalatuista merkeistä, joiden

tarkoituksena on selkeästi erottua pistepilviaineistoissa muusta ympäristöstä (päällysteestä).

Signaloidulla mittauksella pistepilven tarkkuus saadaan absoluuttisesti tarkimmaksi, vaikkakin RTK-GNSS-mittauksella päästään hyvin lähelle samoja tuloksia (Leinonen et al. 2015, s. 19–21). Mobiililaserkeilauksessa käytettävä GNSS-paikannus ja inertianavigaatio tuottavat pistepilven, joka on vain suhteellisesti tarkka. Tällöin pistepilvi on erittäin tarkka suhteessa edelliseen kuljettuun 20 metriin ja kyseisen kohdan poikkileikkauksessa, mutta toisiin ajokertoihin verrattaessa korkeustason ero voi olla kymmeniä senttimetrejä (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 19). Tämän vuoksi suhteellisesti tarkasta pistepilvestä ei voi johtaa automaattisen koneohjauksen koneohjausmallia, jonka täytyy olla absoluuttisesti tarkka. Opastavassa koneohjauksessa suhteellisesti tarkka pistepilvi on riittävä.

Mobiililaserkeilausaineisto jälkiprosessoidaan ohjelmistolla, joka on yleensä laserkeilaimen valmistajan tekemä. Pistepilven jälkiprosessointi sisältää muun muassa seuraavat toimenpiteet (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 20; Cronvall et al. 2012, s. 22):

- sisäinen sovitus eli pistepilvien yhdistäminen eli suuntien 1 ja 2 mittausten (mitattu kaistoittain eri suuntiin) yhteen sovittaminen
- ulkoinen sovitus eli pistepilven siirto hankekohtaiseen koordinaatistoon (georeferointi)
- pistepilven sitomisen absoluuttiseen koordinaatistoon tarkemitattujen signaalipisteiden avulla (mikäli kyseessä on signaloitu mittaus)
- ylimääräisen informaation poistamista aineistosta (kohinat, väärät ja turhat pisteet)
- tiettyjen taiteviivojen (esim. keskiviiva ja reunaviivat) tulkitsemista mittauspisteistä (usein suunnittelija tekee)
- tiedonsiirto suunnitteluvaiheeseen

Mobiililaserkeilauksella on lukuisia etuja verrattuna perinteisiin maanmittauksen menetelmiin, kuten takymetrimittaukseen (Jaakkola 2013, s. 13; P. Niemi, osastopäällikkö, 1.8.2018, haastattelu):

- kustannustehokkuus pitkillä kohteilla
- suhteellinen tarkkuus on erittäin korkea
- korkea pistetiheys

- aineistoa voidaan hyödyntää muihinkin tarkoituksiin, esimerkiksi näkemäanalyysiin
- työturvallisuuden parantuminen alkuvaiheen mittaus- ja merkintätöiden vähentyessä

Niemi pohti tutkimuksessaan (2015, s. 7-8) muita mahdollisia mittausmenetelmiä, joilla voitaisiin muodostaa pistepilvi tietomallipohjaisen päällysteen korjauksen lähtötiedoksi. Niemi esitti, että niin sanottu PTM-malli voisi soveltua suunnittelun lähtötiedoksi. PTM-mallilla hän tarkoitti useasta (tyypillisesti 5-8) PTM-ajon mittausdatasta muodostettua pisteverkkoa. Niemi totesi kuitenkin, että PTM-mallin tuottaminen voisi osoittautua kustannustehokkuudeltaan heikoksi (vrt. mobiililaserkeilaus), sillä siinä tarvitaan useita ajokertoja, joiden mittausdatat vielä tulisi sovittaa yhteen. Lisäksi ajoja pitäisi tehdä ajoradan keskeltä, jolloin tieosuuksia pitäisi sulkea mittausten ajaksi. (Niemi 2015, s. 7-8)

Niemen mukaan muita tarkastelun arvoisia menetelmiä olisivat UAV-lennokeilla sekä 2D-laserkeilaimella mitatut pistepilvet. Lisäksi hän tuo esille mahdollisuuden hyödyntää Heren (ent. Nokia Here) ja Googlen mittaamia pistepilviä. Näissä kaikissa on etuna verkkotasoinen datan kerääminen kustannustehokkaasti. Menetelmien tarkkuus ja pistepilvien tiheys olisi kuitenkin mahdollisesti riittämätön suunnittelun lähtötiedoksi, sillä jo eräiden mobiililaserkeilaimien pistetiheys on todettu liian harvaksi taiteviivojen digitoimiseen. Trafikverketin tutkimuksessa (2017, s. 18) UAV-lennokkiin asennettu laserkeilainjärjestelmä todettiin liian epätarkaksi tuottamaan tietoa tien nykypinnan analysointia varten, mutta tulevaisuudessa, tekniikan kehittyessä, lennokkien hyödyntäminen voi tulla mahdolliseksi.

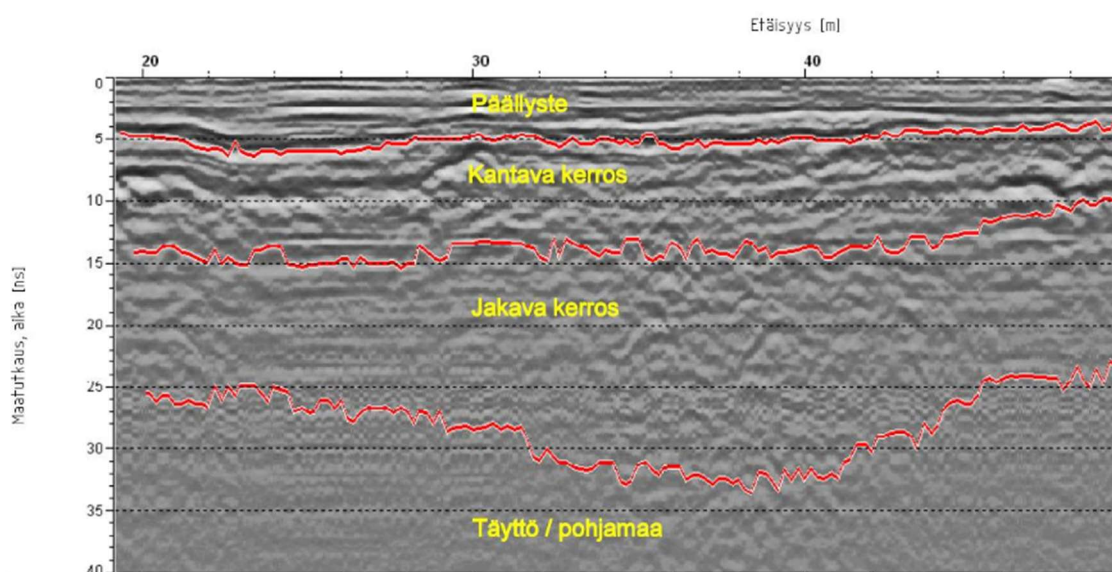
Tien pinnan lisäksi suunnitteluvaiheessa on oltava tietoa tien rakenteesta, kun kohteessa suoritetaan jysintää. Tällöin korjaussuunnitelmassa voidaan välttää tien kantavuutta liiaksi heikentäviä jysintöjä, koska suunnittelijalla on tiedossa tien rakennekerrosten paksuudet. Kerrospaksuudet selvitetään tekemällä maatutkaluotaus vähintään kolmelta linjalta sekä suorittamalla referenssikairauksia (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 20-21).

Maatutkaluotaus on geofysikaalinen tutkimusmenetelmä, missä hyödynnetään radiotaajuuden sähkömagneettisia aaltoja (10–3000 MHz) ja väliaineiden (tien rakennekerrokset) vaihtelevia sähkönjohtavuuden, dielektrisyiden ja magneettisen susceptibiliteetin arvoja. Suomessa tiemateriaalien ja pohjamaan magneettisella

suskeptibiliteetillä ei ole kuitenkaan käytännön merkitystä maatulkuotaimen signaalin etenemiseen. (Hänninen 1991, s. 6; Tiehallinto 2004, s. 10)

Menetelmässä tutka-antenni lähettää maanpintaa kohden sähkömagneettisen pulssin. Sen kohdatessa sähköisiltä ominaisuuksiltaan poikkeavan rajapinnan, osa pulssin aaltoenergiasta heijastuu takaisin ja osa jatkaa eteenpäin kohti seuraavia rajapintoja. Maatulkuotain rekisteröi takaisin heijastuneen aaltoenergian amplitudin sekä ajan, joka on kulunut lähtöhetkestä paluuhetkeen. Pulseja lähetetään nopealla tahdilla, minkä myötä tutkittavan maaperän tai rakenteen eri rajapinnoista saadaan jatkuva luotausprofiili eli tutkakuva (kuva 8). (Hänninen 1991, s. 6; Tiehallinto 2004, s. 10)

Kerrospaksuuksien lisäksi maatulkuotauksella voidaan havaita mm. rumpuputkia, lohkkareita, tiivistyksen rajapintoja, päällysteen halkeamia, rakenteiden kosteuseroja tai –muutoksia, tiehen asennettuja teräsverkkoja tai muita vieraita esineitä (Korkiala-Tanttu & Onninen 2001, s. 6). Maatulkuotauksen yhteydessä on myös otettava referenssikairauksia päällysteen paksuudesta muutama kappale kilometriä kohden luotausprofiilin tulkinnan tueksi (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 20-21). Jos kohde on lyhyt, niin on mahdollista tulkita kerrospaksuudet pelkästään referenssikairauksien avulla. Tällöin poranäytepisteiden väliset etäisyydet tulee kuitenkin olla lyhyempiä (esim. 100 m) (Marttinen 2018, s. 13). Suunnittelija saa yleensä maatulkuotauksen tulokset Excel-taulukon muodossa, josta hän mallintaa tiedot suunnittelujärjestelmään pintamalleiksi (Niemi 2015, s. 7).



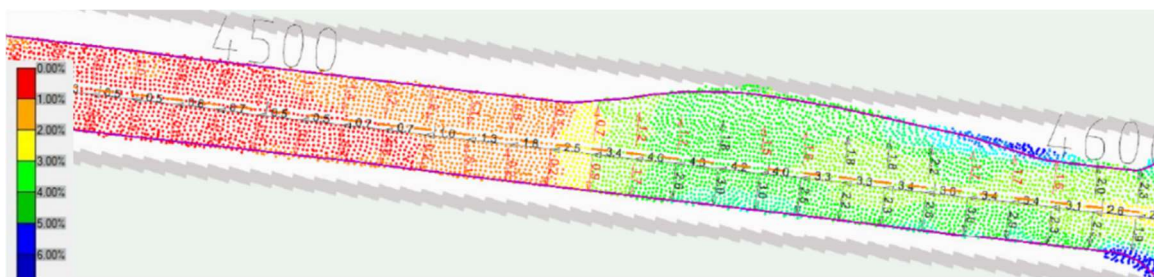
Kuva 8. Esimerkki luotausprofiilista ja sen tulkinnasta (punaisella ja keltaisella). (Virtala 2017, s. 87)

Maatutkaluotauksen ja referenssikairauksien lisäksi voi olla tarpeen tehdä pudotuspainolaite-mittaus (PPL-mittaus) päällysrakenteen sen hetkisen kunnan ja kantavuuden määrittämiseksi (Marttinen 2018, s. 13). YIV 11.2 -ohjeessa suositellaan, että suunnittelija ottaa kantaa PPL-mittauksen tarpeellisuuteen, jos hän joutuu arvioimaan rakenteen kestävyiden muutoksia korjaustoimenpiteiden seurauksena (Marttinen 2018, s. 13). Uudempaa teknologiaa kantavuuden määrittämisessä edustaa Traffic Speed Deflectometer (TSD), joka tuottaa vastaavaa taipumatietoa kuin PPL-mittaus, mutta oleellisena erona on mittausdatan jatkuvuus: PPL-data on pistemäistä (verkkotasolla 100 m:n, hanketasolla 50 m:n välein), TSD jatkuvaa (Tiehallinto 2005, s. 7 & 10; Mäki 2016, s. 2).

Suunnittelijan työ alkaa yleensä mittaajalta saadun mobiililaserkeilausaineiston (jälkikäsitelty pistepilvi) vektoroinnilla. Vektoroinnissa malliin merkitään (”tulkitaan”) ajoradan tietyt taiteviivat, kuten keski- ja reunaviivat, hyödyntämällä pistepilven intensiteettieroja (tumma päällyste / valkoinen maali) ja korkeuseroja. Mikäli kolmas osapuoli (esim. mittaaja) on vektoroinnut taiteviivat aikaisemmassa vaiheessa, on suositeltavaa, että kohteen suunnittelija tarkastaa vektoroinnin tarkkuuden ja laajuuden, sillä taiteviivat ovat olennaisessa roolissa varsinaisessa suunnittelussa ja niihin täytyy pystyä luottamaan. Taiteviivojen tarkkuus ja laajuus tulee määrittää hyvin selkeästi, jos suunnittelija ei tee vektorointia. (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 22)

Toinen oleellinen vaihe lähtöaineiston käsittelyssä on kolmioverkkomallin luonti (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 22). Laserkeilauksen pistepilvestä luotu kolmioverkko on digitaalinen pintamalli eli nykytilamalli, joka kuvaa tien ylimmällä korkeustasolla olevaa pintaa (Oksanen 2018). Pistepilveä on usein syytä harventaa ennen kolmioverkkomallin muodostamista, sillä liian korkealla pistetiheydellä prosessointiin kuluu tarpeettoman paljon aikaa ja tiheän kolmioverkon käsittely voi olla liian raskasta suunnitteluohjelmistolle/tietokoneelle. Pistepilven ja siitä muodostetun kolmioverkon tulee kuitenkin olla niin tiheä, että ajoradan urat ja muut puutteet ovat havaittavissa.

Mobiililaserkeilauksella saatu pistepilvi sisältää paljon tietoa tiestä sekä tien lähiympäristöstä. Pisteiden välisten intensiteetti- ja korkeuserojen avulla voidaan tehdä erilaisia graafisia ja numeerisia esityksiä tien kunnosta, kuten sivukaltevuuksista tai urista (kuvat 9 ja 10).



Kuva 9. Tien nykytilan analysointia sivu- ja pystykaltevuuksien suhteen pistepilveä hyödyntäen. (Niemi 2015, s. 6)

Kuva 10. Tien nykytilan analysointia sivu- ja pystykaltevuuksien suhteen pistepilveä hyödyntäen. (Niemi 2015, s. 7)

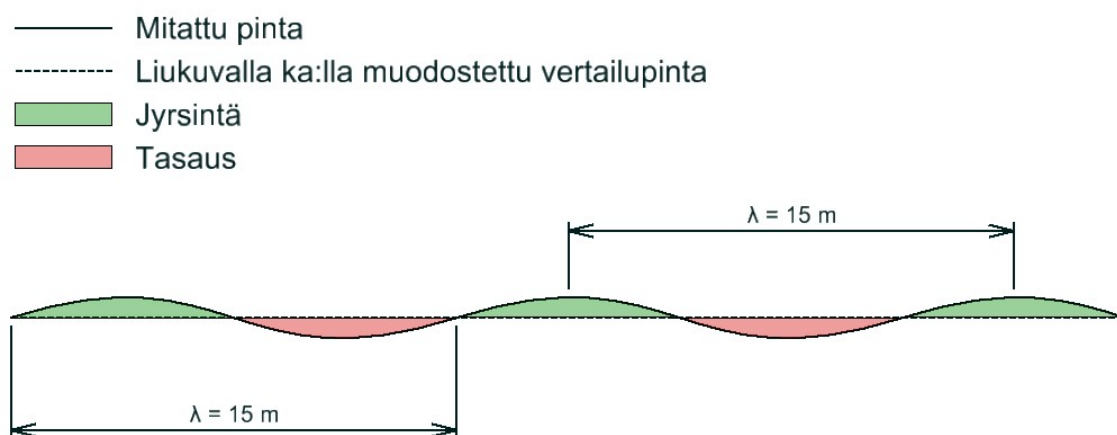
Tietomallipohjaista päällysteen korjauksen suunnittelua tehtäessä opastavaa koneohjausta varten, suunnittelutyö tehdään pääosin 3D-muotoisia tietomalleja hyödyntäen CAD-ohjelmistolla (Computer Aided Design). Suunnittelijan tulee arvioida kohde kokonaisvaltaisesti ja suunnitella toimenpiteet, joilla saavutetaan merkittävimmät tavoitellut hyödyt verrattuna perinteisiin päällysteen korjauksen menettelyihin. Päällystyskohteilla on tyypillisesti hankekohtaiset budjetit, joiden mukaisesti toimenpiteet täytyy optimoida kustannustehokkaasti. (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 24)

3D-suunnittelutyö on mahdollista toteuttaa usealla eri tavalla ja eri ohjelmistojä käyttäen. Esimerkiksi Finnmap Infra Oy käyttää Bentleyyn Microstationia ja Inroadsia yhdessä Excel-taulukkolaskentaohjelmiston kanssa. Muita mahdollisia suunnitteluohjelmistojä päällysteen korjauksen suunnittelussa ovat muun muassa Trimblen Novapoint ja Topcon

Magnet:n Resurfacing -ohjelmistot. Pienempien yritysten ohjelmistoja edustavat muun muassa Roadscanners Oy:n Road Doctor, Terrasolid Oy:n Terra Street (Microstation-ympäristö) ja Geomaat B.V.:n PaveCalc.

Opastavassa koneohjauksessa kannattaa suunnitella vain 20 metriä pitkiä tasauksia, koska mobiililaserkeilaus suoritetaan ilman signalointia. Ilman signaalipisteiden avulla tehtyä tasoituslaskentaa pistepilven korkeusasema saattaa olla merkittävästi väärin heikon satelliittinäkyvyyden vuoksi.

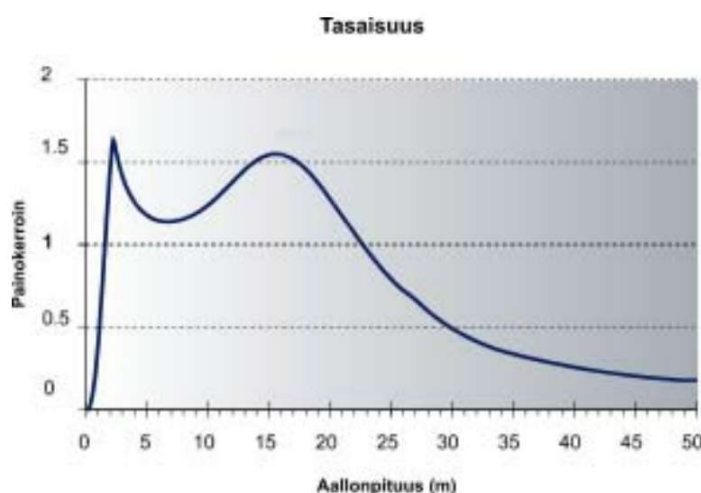
3D-muotoisen suunnittelun lisäksi opastavassa koneohjauksessa suunnittelu on toteutettu myös niin sanotulla liukuvan keskiarvon menettelyllä, jossa 15 metrin liukuvalla keskiarvolla muodostetaan tavoitteellinen ohjauspinta uudelle tasaukselle (kuva 11) (Marttinen & Heikkilä 2015, s. 13). Liukuvalla keskiarvolla muodostetun pinnan ja nykytilamallin korkeuseroja verrataan, jolloin voidaan suunnitella ”pattien” jysintä ja ohjauspinnan alapuolisten ”kuoppien” taseus (Marttinen & Heikkilä 2015, s. 13). Toimenpiteille määritetään tietyt raja-arvot, joiden ylityksestä jysintä tai taseus kannattaa suorittaa (esimerkiksi vain 2 senttimetriä syvemmät kuopat tasataan). Liukuvan keskiarvon -menettelyn etuna on yksinkertaisuus ja alhaisemmat suunnittelukustannukset 3D-suunnitteluun verrattuna (Marttinen 2016, s. 25). Menettelyssä on kuitenkin heikommat vaikuttamisen mahdollisuudet päällysteen korjaustoimenpiteisiin (Marttinen 2016, s. 25).



Kuva 11. Liukuva keskiarvo -menettelyn periaate.

Liukuvana keskiarvona on käytetty 15 metriä, koska kyseisen aallonpituuden epätasaisuuksia koetaan liikennöitävyyden kannalta erittäin häiritseviksi (kuva 12) (Marttinen & Heikkilä 2015, s. 33). Ajomukavuutta tarkastellaan ihmisen kokemien

värähtelyjen kautta, jotka riippuvat tien epätasaisuuksien aallonpituuksien lisäksi ajonopeudesta (Alanaatu et al. 2016, s. 9). Liukuvan keskiarvon pituutta olisikin mahdollista optimoida ottamalla huomioon uudelleen päällystettävän tien keskimääräinen ajonopeus (tien/ajoneuvon nopeusrajoitus). Lisäksi IRI-laskennassa käytettävät painokertoimet eri aallonpituuksille on määritetty 50 vuotta vanhan ajoneuvon jousitusyhteisölle ("Golden car"-parametrit), joten 15 metrin liukuva keskiarvo ei todennäköisesti vastaa nykyisiä henkilöautoja saati raskaampia ajoneuvoja (Alanaatu et al. 2016, s. 8).



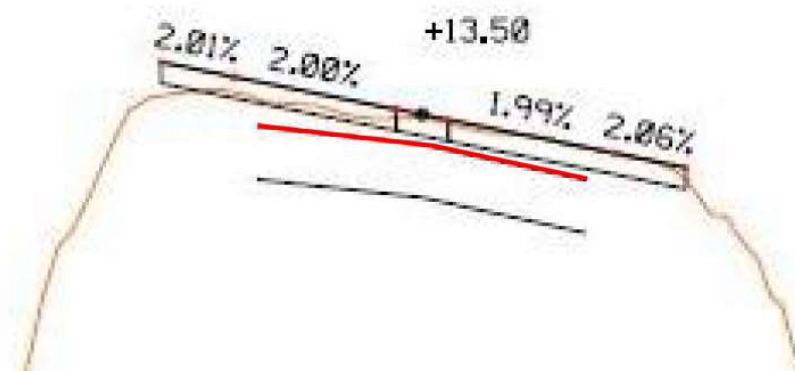
Kuva 12. IRI-arvon laskennassa käytettävät painokertoimet aallonpituuden mukaan. Korkeimmat painokertoimet ovat 2,4 ja 15,4 metrin kohdilla. IRI-simuloinnissa ajoneuvon nopeus on 80 km/h. (Tiehallinto 2007, s. 21; Kohn et al. 2005, s. 12).

Suunnittelijan tulee arvioida laskennallisesti lopullisen päällysrakenteen kestävyyttä, mikäli tien päällysrakennetta muokataan merkittävästi (päällystettä jyrksitään enemmän kuin mikä on tilalle tuleva uuden päällysteen paksuus). Paras menetelmä arviointiin on kuormituskestävyyslaskelmat (esim. APAS-menetelmä), mutta myös Odemark-menetelmää soveltavat kantavuuslaskelmat riittävät selkeissä tapauksissa. Tierakenne on mallinnettava riittävällä tarkkuudella ennen kestävyyslaskelmia. Yleensä mallinnusta varten tarvitaan PPL-mittauksen tulokset sekä tietoa rakennekerroksista (rakennekerrosten lukumäärä, materiaali- ja pohjamaatiedot). (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 31)

Nykytilan rakennemalli muodostetaan esimerkiksi siten, että malli tuottaa laskelmissa PPL-mittaustuloksia vastaavat arvot. Tällöin varmistutaan siitä, että nykyisen rakenteen kunto otetaan laskelmissa huomioon. Suunnitelmaa vastaava rakennemalli saadaan

poistamalla nykytilamallista jyrskittävä päällystepaksuus ja lisäämällä uutta päällystettä. Toteutusmallilla laskettu kuormituskestävyys tulee täyttää tien kestävyysvaatimukset, joissa täytyy huomioida vanhan rakenteen elinikä ja tierakenteen tulevat kuormitukset. Kestävyystarkastelut on syytä tehdä tieosuuksittain, mikäli kohteelle suunnitellaan erilaisia korjaustoimenpiteitä tai nykyiset rakennekerrokset muuttuvat merkittävästi eri osuuksilla. (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 32)

Suunnitelmamalleihin kannattaa tehdä kestävyystarkasteluiden tuloksia vastaavat nykyisen päällysteen minimipaksuudet (kuva 13). Suunnitelma-aineistoon liitetään kuormituskestävyystarkastelut sekä niissä käytetyt parametritiedot, joista täytyy käydä ilmi, perustuvatko käytetyt arvot mittauksiin vai ovatko ne oletuksia. (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 32)



Kuva 13. Poikkileikkaus, jossa mustalla viivalla maatukaluotauksella mitattu päällystepaksuus ja punaisella kuormituskestävyystarkastelujen edellyttämä minimipaksuus. Musta laatikko esittää uutta päällystekerrosta.

Opastavassa koneohjauksessa päällystystyökoneita ohjataan yleensä tiehen tehdyillä maalimerkinnöillä (kuva 14). Koneenkuljettaja lukee jyrskintä-/tasaussyvytydet ja sivukaltevuudet maalatuista merkinnöistä (esimerkiksi 5 metrin välein) ja pyrkii ohjaamaan työkonetta niiden mukaisesti. Koneenkuljettaja voi lukea ohjausarvot myös taulutietokoneelta ("tabletilta") tai joltain muulta mobiililaitteelta, jossa on GNSS-vastaanotin koneen paikannusta varten. Opastavassa koneohjauksessa ei hyödynnetä erillisiä päällystystyökoneeseen asennettavia koneohjauksen komponentteja.



Kuva 14. Esimerkki maalimerkinnöistä opastavassa koneohjauksessa. Vihreällä paalulukema (m), valkoisella sivukaltevuus ja punaisella jyrksintäsyvyys (mm). (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 33)

YIV-ohjeessa 11.2 annetut ohjeet laadunhallintaan ja laatuvaatimuksiin (taulukko 4). Opastavalla koneohjauksella saavutettavaa tarkkuutta on tutkittu ainakin Finnmap Infran suunnittelemisissa kohteissa kantatie 55 (toteutettu 2015) ja valtatie 6 (toteutettu 2017) (taulukko 5). Valtatie 6:n projektissa on havaittavissa selvä systemaattinen virhe (kuva 15).

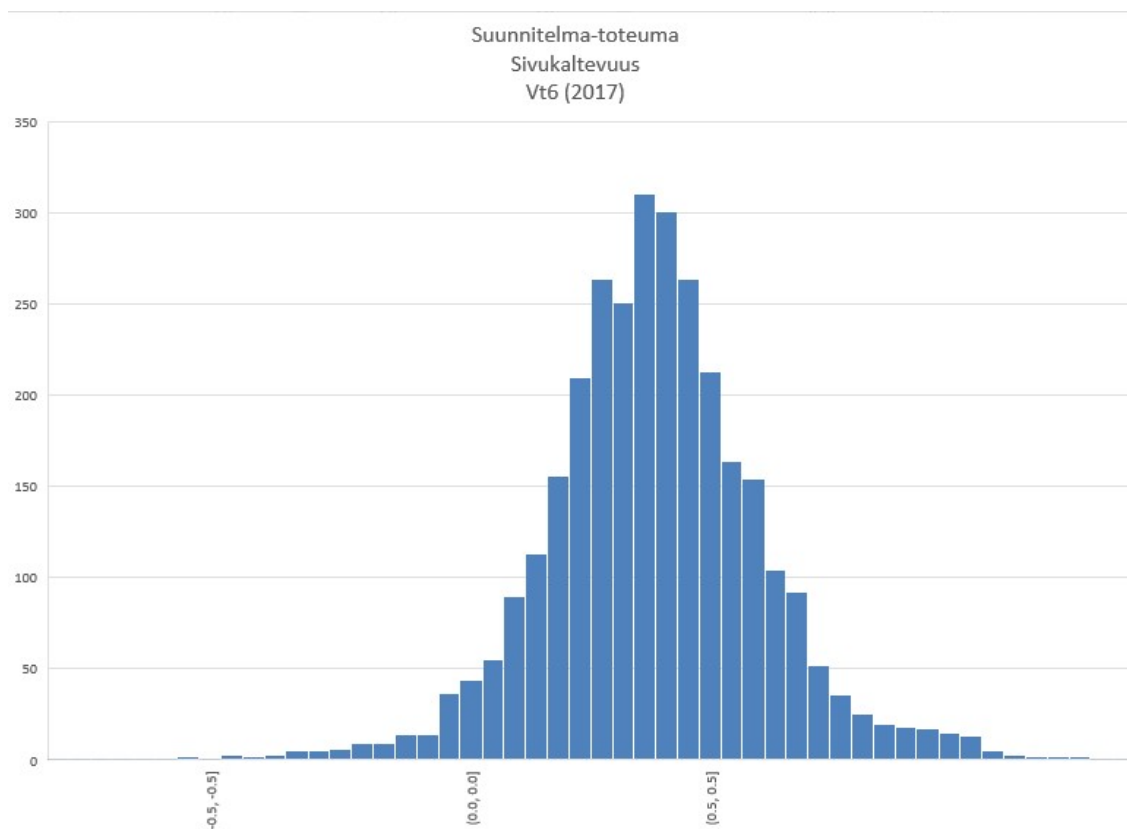
Taulukko 4. Laadunhallinta ja laatuvaatimukset opastavassa koneohjauksessa (Marttinen 2018, s. 22).

Korkeusasema keskilinjalta	Sivukaltevuus	IRI / IRI4
<ul style="list-style-type: none"> - Mittatiheys on suunnitelmapisteiden väli - Tekniikkavaatimus: rullamitta - Tilaaja asettaa tarvittaessa laatuvaatimuksen toteumalle; suositus +/- 20 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Raakadatasta tehtävä tulostustiheys 5 metriä - Tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5209) - Laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen 	<ul style="list-style-type: none"> - Raakadatasta tehtävä tulostustiheys 10 metriä ja 100m - Tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5207) - Laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen

Taulukko 5. Opastavalla koneohjauksella toteutettujen päällystyskohteiden korkeusaseman ja sivukaltevuuden tarkkuuksia koneohjausmalliin nähden.

	Jyrsintäpinta ⁽¹⁾ [m]		Sivukaltevuus ⁽²⁾ [m]	
	Keskihajonta	Keskiarvo	Keskihajonta	Keskiarvo
Kt55 (2015)	0,004	-0,001	0,30	0,02
Vt6 (2017)	-	-	0,20	0,296

1. Laadunvarmistus toteutettu rullamitalla (jyrsintäsyvyys) ja laserkeilaimella (sivukaltevuus)
2. 5 metrin keskiarvo, lopulliselle päällysteelle



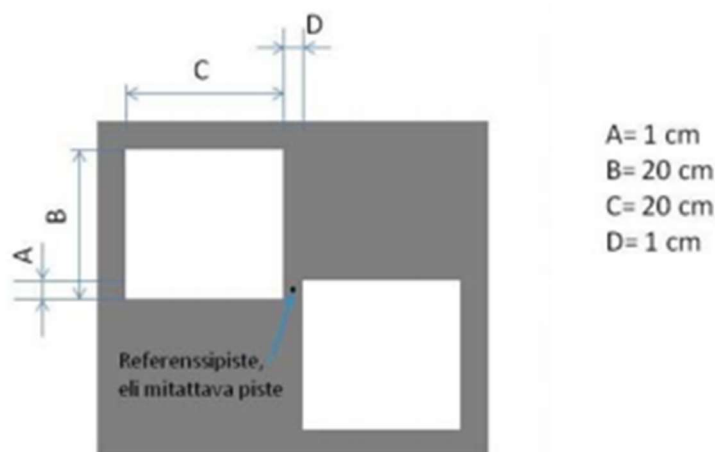
Kuva 15. Histogrammi sivukaltevuuden toteumaverrannosta VT6-projektissa.

1.3.2 Automaattinen koneohjaus

YIV-ohjeissa ohjaavasta koneohjauksesta käytetään nimitystä automaattinen koneohjaus. Yhteneväisyyden vuoksi myös tässä työssä käytetään samaa nimitystä.

Automaattinen 3D-koneohjaus vaatii absoluuttisesti tarkat koordinaatit, minkä vuoksi mobiililaserkeilaus toteutetaan signaloituna. Menetelmässä suunnittelu- ja koneohjausmallit ovat globaalissa koordinaatti- (esim. WGS 84) ja korkeusjärjestelmässä (esim. N2000). Toisin kuin opastava koneohjaus, automaattinen 3D-koneohjaus soveltuu kohteisiin, joissa on liittymäalueita, siltoja, bussipysäkkejä tai muita erityiskohteita, jotka vaativat tarkan toteutuksen (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 33).

Signalointi-menettelyssä mobiililaserkeilauksella tuotettu pistepilvi jälkikäsitellään referenssipisteiden avulla absoluuttisesti tarkaksi. Referenssipisteet ovat takymetrillä tai tarkkavaaitsemalla tarkasti mitattuja pisteitä, jotka merkataan tiehen (kuva 16). Signaalin koko suhteutetaan pistetiheyteen sopivaksi, jotta kuvio eroaa ympäristöstä selkeästi. Pistepilviaineisto sidotaan referenssipisteisiin, jolloin pisteiden korkeusasema saadaan riittävän tarkaksi automaattista koneohjausta varten.



Kuva 16. Signaalipiste. Tumman harmaalla päällysteen pinta, valkoisella maalimerkinnät. (mukaillen Leinonen et al. 2015, s. 20)

Tien rakenteen selvittämisen osalta opastava koneohjaus ei eroa mitenkään opastavasta koneohjauksesta. Toisin kuin opastavassa koneohjauksessa, automaattisessa koneohjauksessa suunniteltavien tasauksien pituuksiin ei ole rajoitusta. Tämä johtuu siitä, että mobiililaserkeilaus on toteutettu signaloituna. Automaattisessa koneohjauksessa on siten paremmat vaikutusmahdollisuudet suunnitteluvaiheessa. Suunnittelu tehdään 3D-muotoisen tietomallin avulla suunnitteluohjelmistoilla (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 24).

Automaattinen 3D-koneohjaus voidaan toteuttaa usealla eri koneohjausperiaatteella (katso kappale 1.2), mutta Suomessa on kirjallisuusselvityksen ja haastattelujen perusteella käytetty ainoastaan takymetriohjausta. Tämän vuoksi myös YIV-ohjeissa 11.1 ja 11.2 käsitellään ainoastaan takymetriohjausta.

Urakoitsijalla on suunnittelijalta saatu koneohjausmalli, joka on Inframodel-tiedonsiirtoformaattissa (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 32). Koneohjausmalli siirretään koneohjausjärjestelmään joko muistitikulla tai Internet-yhteyden välityksellä (Marttinen & Pienimäki 2015, s. 32). Ennen työn alkua päällystystyökoneeseen asennetaan

koneohjausjärjestelmä, mikä vaatii kokonaisen työpäivän (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 7.1.2019, haastattelu; V.-M. Tanhuanpää, market segment manager, & J. Kokko, asiantuntija, 10.1.2019, haastattelu). Mikäli koneessa on aiemmin ollut 3D-koneohjausjärjestelmä ja tietyt peruskomponentit ovat edelleen paikallaan (esimerkiksi kaapeloinnit ja kytkentärasia), asennus on huomattavasti nopeampaa (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 7.1.2019, haastattelu; V.-M. Tanhuanpää, market segment manager, & J. Kokko, asiantuntija, 10.1.2019, haastattelu).

Tieväylillä työkonen ulkopuolella takymetrejä tarvitaan vähintään kaksi kappaletta: työkonetta ohjaa yksi takymetri ja toista siirretään seuraavaan kojeasemapaikkaan työn edetessä tielinjalla. Takymetrien operointiin tarvitaan vähintään yksi mittamies. Ennen päällystystöiden aloitusta, mittamies suunnittelee takymetrien paikat kohteen varrella. Töiden aikana mittamies siirtää ja orientoi (takymetrin paikannus tunnetuista pisteistä) takymetrit suunnitelman mukaisille sijainneille. Työn toteutussuunnittelussa on huomioitava se, että aktiivisen takymetrin ja päällystystyökoneessa olevan aktiiviprisman välillä on oltava jatkuva näkölinja. Tämä vaatimus asettaa rajoituksia sekä takymetrien sijainneille että kohteessa suoritettavalle työmaaliikenteelle. (Marttinen & Heikkilä 2014, s. 15 & 34; V.-M. Tanhuanpää, market segment manager, & J. Kokko, asiantuntija, 10.1.2019, haastattelu)

YIV-ohjeessa 11.2 annetut ohjeet laadunhallintaan ja laatuvaatimuksiin (taulukko 6). Takymetriohjaukseen perustuvan 3D-koneohjatun päällystystyön tarkkuutta on Suomessa tutkittu ainakin Maintenance BIM -projektin (Kt51 & Vt6, 2012) sekä Vt13-hankkeen (2013) piloteissa (taulukko 7).

Taulukko 6. Laadunhallinta ja laatuvaatimukset automaattisessa 3D-koneohjauksessa (Marttinen 2018, s. 22).

Korkeusasema keskilinjalta	Sivukaltevuus	IRI / IRI4
<ul style="list-style-type: none"> - Tilaaja asettaa vaatimuksen mittaustiheydelle; suositus: 5-20 metriä kohteesta riippuen - Tekniikkavaatimus: vähintään yhtä tarkka tekniikka kuin millä signalointipisteet on mitattu - Tilaaja asettaa tarvittaessa laatuvaatimuksen toteumalle; suositus +/- 20 mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Raakadatasta tehtävä tulostustiheys 5 metriä - Tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5209) - Laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinnormien mukainen 	<ul style="list-style-type: none"> - Raakadatasta tehtävä tulostustiheys 10 metriä ja 100m - Tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5207) - Laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinnormien mukainen

Taulukko 7. 3D-koneohjauksella toteutettujen päällystyskohteiden korkeusaseman tarkkuuksia koneohjausmalliin nähden (Marttinen & Heikkilä 2014, s. 34 & 43; Jaakkola 2013, s. 20).

	Jyrsintäpinta [m]		Massatasauspinta [m]	
	Keskihajonta	Keskiarvo	Keskihajonta	Keskiarvo
Kt51	0,010	-0,006	-	-
Vt6: Kohde A	0,036	-0,006	0,027	0,002
Vt6: Kohde B	0,007	-0,003	0,011	0,001
Vt6: Kohde C	0,040	0,001	-	-
Vt13	0,006	-0,003	0,011	-0,003
<i>Laadunvarmistus toteutettu robottitakymetrillä</i>				

Yllä oleviin tuloksiin sisältyvät prosessin kaikki virheet eli lähtötiedon, toteutuksen ja laadunvarmistukseen virheet. Tekniikan kehittymisen ja projekteista kertyneen kokemuksen myötä nykyään 3D-koneohjauksella päästään yleensä +/- 5 millimetrin tarkkuuteen sekä jyrsinnässä että tasauksessa (J. Paitsola, osastopäällikkö, 7.8.2018, sähköpostikeskustelu; M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 5.2.2019, sähköpostikeskustelu).

1.4 Nykyisten menetelmien haasteet ja ongelmat

Sekä automaattinen 3D-koneohjaus että opastava koneohjaus ovat osoittautuneet kustannustehokkaiksi vaihtoehtoiksi perinteisten menetelmien rinnalle päällysteen korjauksessa, kun tavoitellaan jotain muuta kuin kauttaaltaan kohteen pituudelta tasapaksua päällystekerrosta. Marttinen (2018, s. 6) on listannut tietomallipohjaisen korjaus- ja uudisrakentamisen hyödyiksi seuraavia seikkoja:

- tuottavuuden parantuminen rakentamisessa
- virheiden vähentyminen
- suunnittelun ja rakentamisen laatu paranee
- kustannusten parempi hallinta
- luotettavammat määrätiedot
- parempi kommunikointi ja yhteistyö osapuolien välillä
- suunnitteluratkaisujen havainnollistaminen
- prosessin eri toimintojen parempi läpinäkyvyys

Korjausrakentamisessa tietomallintaminen mahdollistaa (Marttinen 2018, s. 6)

- lähtötietojen hyödyntämisen nopeasti ja havainnollisesti

- kohteeseen liittyvien tietojen siirtämisen keskitetysti vaiheesta toiseen
- suunnitteluratkaisujen visualisoinnin suhteessa lähtötilanteeseen
- korjaukseen käytettävien varojen optimoinnin kohdentamalla toimenpiteet kaikkein ongelmallisimpiin kohtiin
- korjaustöiden turvallisuuden lisäämisen
- hankintamenettelyn kehittämisen

Näissä nykyisin käytetyissä tietomallipohjaisissa päällystystyön toteutustavoissa on omat etunsa ja haittansa. Automaattinen koneohjaus globaalissa koordinaatistossa tuottaa laadukkaan lopputuloksen, mutta on kallis toteuttaa signaloinnin ja takymetriohjauksen vuoksi. Lisäksi menetelmän edellyttämä laitteistojen välinen tiedonsiirto on altis häiriöille, mikä hankaloittaa työtä ja aiheuttaa lisäkustannuksia. Takymetrien käyttämisessä huomioitavia häiriölähteitä ovat ainakin (J. Paitsola, osastopäällikkö, 7.8.2018, sähköpostikeskustelu; M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 7.1.2019, haastattelu; Sarjanen 2016, s. 8):

- takymetrin ja aktiiviprisman väliselle näköyhteydelle tulee este
- tärinä kojeen ohi ajavista autoista tai työkoneista
- kojeen kolmijalan painuminen tai liikkuminen
- lämpöväreily
- sade ja tiheä sumu
- päällysteen/tierakenteen pystysuuntainen liike työkoneen tai muun liikenteen kuormituksen vuoksi

Opastava koneohjaus on helposti toteutettavissa ja edullisempi vaihtoehto, mutta päällystystyön lopputuloksessa ei päästä samaan laatutasoon kuin automaattisessa 3D-koneohjauksessa. (M. Pienimäki, erityisasiantuntija & P. Niemi, osastopäällikkö, 10.6.2018, haastattelu)

1.5 Tavoite

Työn tavoitteena on kehittää toimintamalli päällystystyön toteuttamiseen automaattisesti koneohjattuna tien olemassa olevaan pintaan nähden. Erityisesti tavoitteena on selvittää tämän toimintamallin tarkkuutta, luotettavuutta (kyky säilyttää toimintakyky ja tarkkuus) ja taloudellisuutta. Tällaista koneohjausperiaatetta olemassa olevaan tien pintaan nähden ei ole toteutettu aikaisemmin Suomessa. Siinä tarvittavia mittaus- ja ohjausjärjestelmiä ei

ole saatavilla. Niinpä samanaikaisesti tavoitteena on kehittää menetelmään soveltuvat laitteet ja mittausmenetelmät yhteistyössä koneohjausjärjestelmien valmistajan kanssa. Työssä laaditaan buildingSmart YIV-ohjeistuksen mukainen menetelmäkuvaus toimintatavasta.

Työn hyödyt eri osapuolille ovat:

- FMI
 - pääsee määrittelemään suunnittelu-, koneohjaus- ja toteutusmenettelyt
 - voi kehittää suunnitteluvalmiuksiaan menetelmän osalta
 - saa valmiudet menettelyyn soveltuvien suunnitelmien tuottamiseksi
- tilaaja
 - saa käyttöönsä uuden ja edullisen päällystystöiden toteutustavan
 - voi hyödyntää työn tulokset nopeasti käytännössä
- urakoitsija ja laitevalmistaja
 - voivat hyödyntää kehitettävää menetelmää omassa laite- ja järjestelmäkehitystyössään jo työmenetelmän määrittelyvaiheessa

2 TIEVÄYLIEN PÄÄLLYSTYSTYÖKONEIDEN OHJAUS SUHTEELLISESSA KOORDINAATISTOSSA

2.1 Suhteellinen ohjausmenetelmä ja osavaiheet

Kehitettävä menetelmä (jatkossa ”pinnasta ohjaava koneohjaus/menetelmä”) on vaiheiltaan pitkälti samanlainen kuin nykyiset menetelmät, sillä siinä yhdistyy ominaisuuksia molemmista. Tietomallipohjainen päällystystyö voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

1. Lähtötietojen hankinta ja käsittely
2. Suunnittelu
3. Toteutus automaattisella tai opastavalla koneohjauksella
4. Laadunvarmistus

Merkittävin ero nykyisiin menetelmiin on toteutusvaiheessa, sillä koneohjauksen periaate eroaa paljon nykyisistä menetelmistä. Lisäksi suunnitteluvaiheen jälkeen urakoitsijalle luovutettava aineisto poikkeaa nykyisistä.

2.1.1 Lähtötiedot ja niiden käsittely

Menetelmässä ei ole tarpeen käyttää absoluuttisesti tarkkaa lähtöaineistoa, minkä vuoksi mobiililaserkeilaus voidaan toteuttaa ilman signalointia kuten opastavassa koneohjauksessa. Muilta osin lähtötietotarpeet ja lähtötietojen käsittely ovat samat kuin nykyisissä menetelmissä (katso kappale 1.3).

2.1.2 Suunnittelu

Suunnitteluvaihe on luovutettavaa aineistoa koskevia vaatimuksia lukuun ottamatta samanlainen kuin opastavassa koneohjauksessa. Tämä johtuu siitä, että molemmissa menetelmissä hyödynnetään suhteellisesti tarkkaa aineistoa, mikä aiheuttaa rajauksen pituussuuntaisen geometrian suunnitteluun (pisimmillään 20 metrin pituussuuntainen geometria). Suunnittelussa luodaan tietomalli, jossa on toteutuksen edellyttämät ohjausarvot Northing-, Easting-koordinaatteihin sidotut sivukaltevuuden ja työstösyvyyksien ohjausarvot. Työn tuloksissa on esitetty tarkemmin pinnasta ohjaavan menetelmään luovutettavat suunnittelu- ja koneohjausmallit.

2.1.3 Toteutus

Päällysteen korjaus aloitetaan keski- tai reunaviivalta, sillä olemassa olevia tiemerkeitä seuraamalla koneenkuljettaja voi ohjata asfalttikonetta tarkasti. On erittäin harvinaista, että päällysteen korjaus aloitettaisiin kaistan keskeltä (taiteviivojen välistä) (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 21.9.2018, haastattelu). Tällöin pitäisi jollain tavalla varmistaa se, että koneenkuljettaja pystyy helposti seuraamaan oikeaa ajolinjaa. Todennäköisesti tällaisessa tapauksessa maalattaisiin keski- tai reunaviivan kaltainen seurantalinja kaistan keskelle (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 21.9.2018, haastattelu). Tällöin myös koneohjausmallissa täytyy olla taiteviivat ja ohjausarvot kaistan keskelle.

Koneohjausjärjestelmän komponentit on esitetty kuvissa 17 ja 18. GNSS-vastaanotin ja antenni (antenneja 1-2 kappaletta) mittaavat työkoneen työstöpinnan (jyrsinrumpu tai ohjauspalkki) absoluuttisen horisontaalisen sijainnin. GNSS-antennissa täytyy olla kaltevuusanturi, joka kompensoi antennimaston sivukaltevuutta GNSS-paikannukselle. Toinen kaltevuusanturi mittaa jyrsinrummun tai ohjauspalkin sivukaltevuutta, jonka ohjausarvot koneohjausjärjestelmä lukee koneohjausmallista. Kaksiakselisella kallistusanturilla koneohjausjärjestelmä voisi havaita myös asfalttikoneen rungon asennon (pituuskaltevuus).

1. GNSS-vastaanotin ja -antenni

2a. Ultraääni-anturi

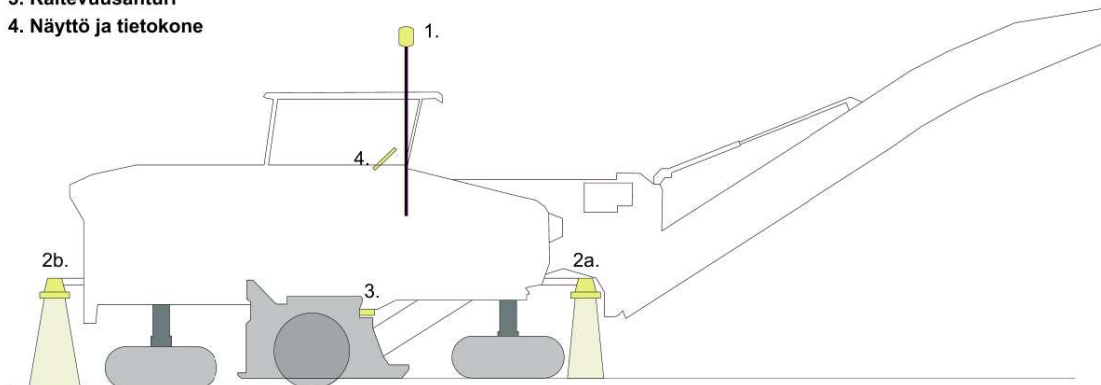
- jyrsinrummun / levitinpalkin suhteellisen korkeusaseman määrittäminen sekä toteuman mittaus

2b. Ultraääni-anturi

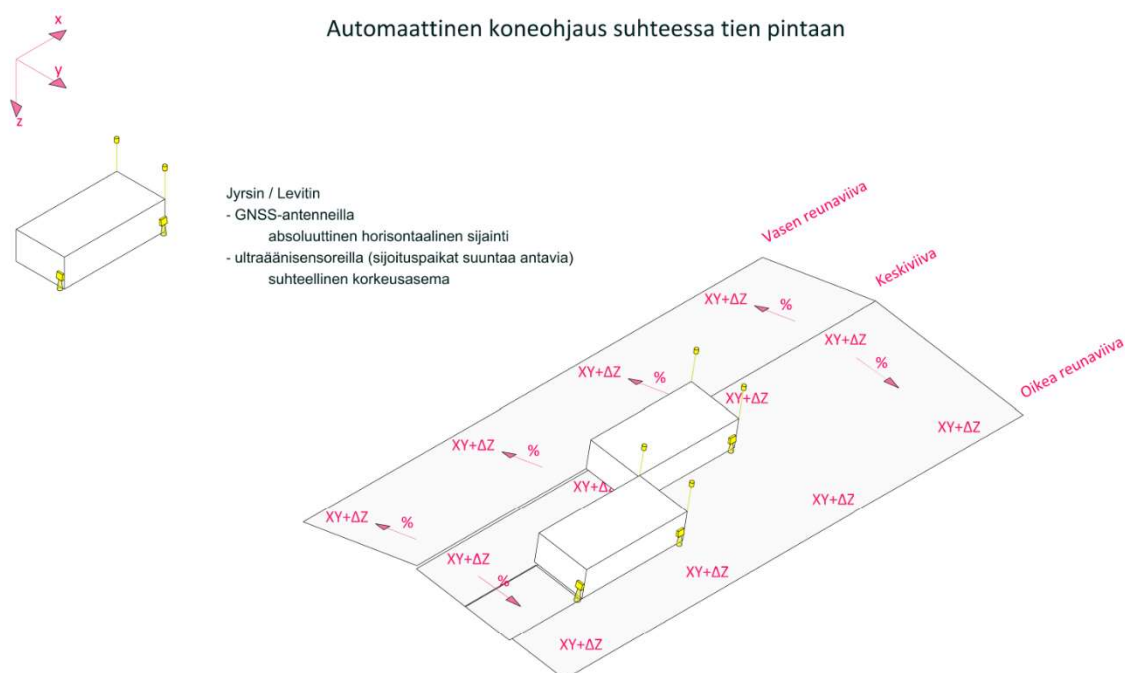
- toteuman automaattinen mittaus

3. Kaltevuusanturi

4. Näyttö ja tietokone

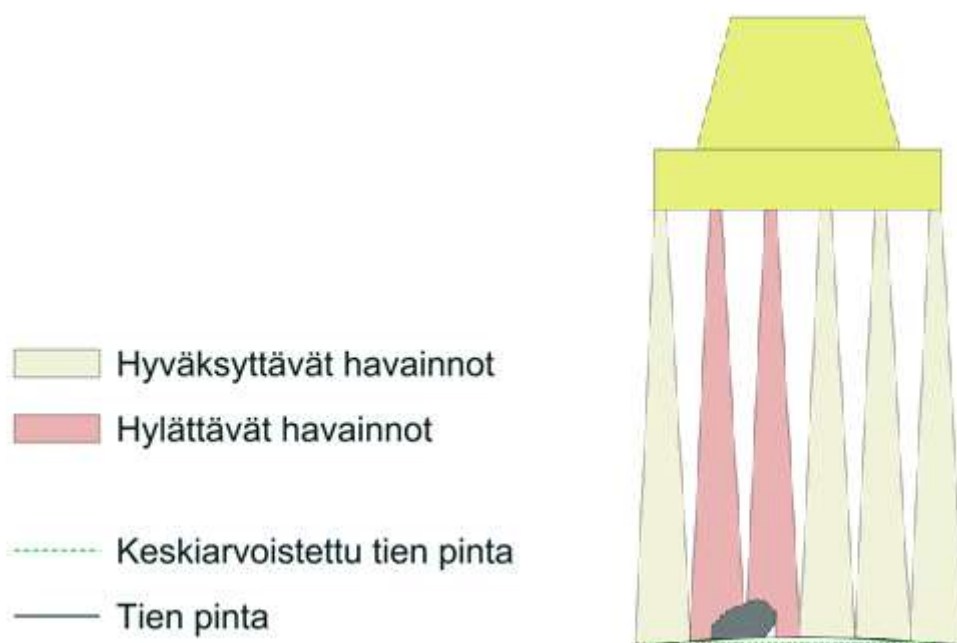


Kuva 17. Koneohjausjärjestelmän toimintaperiaatteen kannalta oleelliset komponentit jyrsinkoneessa. Komponentit ja niiden sijainnit voivat vaihdella. Esimerkiksi ultraäänianturin sijaan voidaan käyttää pistelaseria etäisyyden mittauksessa.



Kuva 18. Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan.

Koneen etuosassa oleva ultraäänianturi mittaa suhteellisen etäisyyden nykyisestä tien pinnasta (referenssitaso), josta koneohjausjärjestelmän automatiikka määrittää jyrsinrummun/ohjauspalkin työstötason koneohjausmallin perusteella. Koneen takaosan ultraäänianturi mittaa jyrsityn pinnan suhteellisen tason ja tuottaa automaattista toteumatietoa. Ultraäänianturin mittaustulokset tulee keskiarvoistaa siten, että paikalliset, lyhytaaltoiset epätasaisuudet (esimerkiksi karkeus, nypytys, halkeamat tai kivet) eivät vääristäisi suhteellista etäisyyttä päällysteestä. Erityisesti jyrsityn pinnan mittauksessa (toteumatieto) karkea pinta ja jyrsinrouhe voi vääristää tuloksia ilman keskiarvoistamista (Olli 2017 s. 6). Lisäksi mittaustuloksista tulisi suodattaa merkittävät poikkeamat (kuva 19). Ultraäänianturi toimisi tällöin samalla periaatteella kuin 2D-järjestelmien keskiarvoistavat ultraääni-sukset (sonic averaging system/ski), mutta pienemmässä mittakaavassa (Joseph Vögele AG 2018; MOBA AG 2013). Ultraäänianturien sijaan voisi myös käyttää pistelasereita etäisyyden mittaukseen. Päällystystyökoneiden koneohjauksessa on kuitenkin tyypillisesti hyödynnetty ultraääniantureita.



Kuva 19. Ultraäänimittaus, jossa jätetään huomioimatta selkeät poikkeamat liukuvalla keskiarvolla muodostettavasta referenssipinnasta.

Tietokone ja näyttö muodostavat koneohjausjärjestelmän ohjausyksikön. Graafiselta näytöltä koneenkuljettaja näkee reaaliaikaisesti työkonen työkalun sijainnin ja asennon koneohjausmalliin nähden. Näytöltä on myös hyvä olla mahdollisuus seurata satelliittipaikannukseen tilaa ja toteumatietoa, kuten:

- käytössä ja käytettävissä olevien satelliittien lukumäärä
- paikannuksen keskivirhettä
- DOP (dilution of precision) -arvoa eli satelliittigeometrian hyvyttä
- suunnitelman ja toteutuksen poikkeamia työstötasossa (keskiarvo ja keskihajonta)

Lisäksi koneohjausjärjestelmässä on syytä olla komponentteja, jotka varoittavat koneohjausjärjestelmään liittyvistä häiriöistä (esimerkiksi käytettävien satelliittien lukumäärä on pieni tai paikannuksen keskivirhe ylittää asetetun raja-arvon). Näitä voivat olla ääni- ja/tai valohälyttimet.

Heikon satelliittiyhteyden tai sen katkeamisen tapauksessa paikannusta voisi tukea tai sijaistaa IMU-laite tai matkamittari. Molemmissa mittausmenetelmissä on kuitenkin ongelmana epätarkkuus ja virheiden kasautuminen (”ryömintä”), minkä vuoksi koneohjaus voi olla niiden varassa ainoastaan rajoitetun ajan.

On tärkeää, että koneohjausjärjestelmän myyjän oma tekninen asentaja tai joku muu riittävän tietotaidon omaava henkilö asentaa komponentit päällystystyökoneeseen ja kalibroi mittalaitteet. Laitteiden kalibroinnissa tulee huomioida päällystystyökoneen kulumat, kuten jyrsinpiikkien kuluma. Taulukossa 8 on esitetty kalibrointimenetelmiä koneohjausjärjestelmän mittalaitteille. Kalibroinnit on dokumentoitava ja pyydettyäessä toimitettava päällystystyön tilaajalle.

Taulukko 8. Mahdollisia kalibrointimenetelmiä koneohjausjärjestelmän komponentteihin.

Mittalaite	Kalibrointimenetelmä
Ultraäänianturi	<p><i>"Nolla"-jyrshintä/levitys:</i> asetetaan suhteelliseksi työstösyvyydeksi 0 mm ja mitataan toteutunut jyrshintä/levitys tarkalla mittalaitteella. Ohjausarvon ja toteutuneen etäisyyden erotuksesta saadaan korjaus/kalibrointi-arvo koneohjausjärjestelmään.</p> <p><i>Ohut jyrshintä/levitys:</i> asetetaan suhteelliseksi työstösyvyydeksi pieni arvo (esim. jyrshinnässä 5-10 mm) ja mitataan toteutunut jyrshintä/levitys tarkalla mittalaitteella. Ohjausarvon ja toteutuneen jyrshinnan erotuksesta saadaan korjaus/kalibrointi-arvo koneohjausjärjestelmään.</p> <p><i>Automaattinen kalibrointi jyrshinnan/levityksen aikana:</i> Koneen edessä ja takana olevien uä-mittausten tuloksista saadaan jatkuva suunnitellun ja toteutuneen jyrshinnan vertailu. Poikkeamat suunnitellun ja toteutuneen välillä johtavat automaattiseen työstötason ohjauksen kalibrointiin.</p>
Sivukaltevuusanturi	Asetetaan sivukaltevuudelle jokin ohjausarvo, mitataan erillisellä, kalibroidulla, kaltevuuden mittaustalaitteella (esim. oikolauta). Ohjausarvon ja toteutuneen kaltevuuden erotuksesta saadaan korjaus/kalibrointi-arvo koneohjausjärjestelmään.
GNSS-antenni ja -vastaanotin	Tarkemmitatut kontrollipisteet

2.1.4 Laadunvarmistus

Menetelmä hyödyntää suhteellisesti tarkkaa lähtötietoa kuten opastavassa koneohjauksessa, minkä vuoksi myös laadunvarmistus toteutetaan samalla tarkkuudella. YIV-ohjeessa 11.2 opastavan koneohjauksen laadunvarmistus on esitetty kappaleessa 1.3.2 *Opastava koneohjaus*.

2.1.5 Satunnaisvirheiden lähteet

Lähtöaineiston epätarkkuus johtuu mobiililaserkeilauksen epätarkkuuksista, joista tarkasteltavassa menetelmässä huomioidaan jälkilasketun pistepilven absoluuttinen tasosijainti (Northing, Easting), suhteellinen korkeusasema sekä kaltevuustarkkuus. Pistepilven suhteellinen tarkkuus vaihtelee eri valmistajien välillä, mutta tyypillinen

keskivirhe on 5–10 mm (Trimble Inc. 2013a-b & 2018a; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2017 & 2018). Valmistajien lukuja ei voida kuitenkaan käyttää arvioitaessa lähtöaineiston pystysuuntaista tarkkuutta, sillä lähtöaineiston käsittelyssä taiteviivoja ei piirretä pisteiden kautta, vaan suorina ja kaarteina kolmioverkkomuotoisen nykytilamallin läpi joko pisteiden välistä (keskiarvo) tai alimman pistepinnan kautta. Absoluuttista korkeusasemaa käytettäessä alimpien pisteiden kautta piirretyt taiteviivat ovat ”turvallinen ratkaisu”, sillä tällöin pienennetään entisestään riskiä jyrsiä liian syvältä. Suhteellisesti tarkkaa aineistoa hyödynnettäessä taiteviivojen piirtämismenettelyllä ei ole merkitystä, kunhan se tehdään samalla tavalla läpi kohteen. Valmistajat ilmoittavat suhteellisen virheen yleensä mittausmatkoille, joita ei käytännössä toteudu tien nykytilan analysoinnissa. Esimerkiksi Trimble ilmoittaa MX2 ja MX8 laserkeilaimien suhteellisen tarkkuuden 50 metrin etäisyydelle, mutta tien nykykunnan analysoimisessa mittausmatkat ovat korkeimmillaan noin 15 metriä (L. Hartikainen 11.2.2019, sähköpostikeskustelu; Trimble Inc., 2013a-b). Lähtötiedon pystysuuntaisen keskivirhe on arviolta 0,003 m.

Mobiililaserkeilaimen aiheutuvat sivukaltevuuteen virheet ovat erittäin pieniä, sillä GNSS-IMU -laitteen kallistus- (roll), nyökkäys- (pitch) ja kääntymis- (yaw) -tarkkuudet ovat tyypillisesti 0,005-0,015 astetta (Trimble Inc. 2018a; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2019). Esimerkiksi 0,01 asteen virhe vastaa tien sivukaltevuudessa 0,017 %-yksikön virhettä. Tietomalleissa (suunnittelu ja toteutus) sivukaltevuudet ilmoitetaan tyypillisesti 2 desimaalin tarkkuudella, jolloin pyöristys voi joko kasvattaa tai pienentää virhettä 0,005 %. Koska sivukaltevuus määräytyy pistepilven perusteella, niin sen suhteellisella tarkkuudella (0,003 m) on myös merkitystä sivukaltevuudelle. Tarkasteltavan menetelmän lähtötieto- ja suunnitteluvaiheen kaltevuuden keskivirhe on arviolta 0,02 %-yksikköä.

Toteutusvaiheen tasosijainnin, suhteellisen etäisyyden ja sivukaltevuuden mittaamisessa käytettävien mittalaitteiden (RTK-GNSS, kaltevuus- ja ultraäänianturi) tarkkuuksina käytettiin kirjallisuudesta löytyviä ja koneohjausjärjestelmävalmistajien ilmoittamia arvoja. Tarkasteltavan menetelmän toteutusvaiheen tasosijainnin mittaustarkkuus on 0,02 metriä, sivukaltevuusanturin 0,05 / 0,1 %-yksikköä (asfaltinlevitin/jyrsin) ja ultraäänianturin 0,002 metriä (Joseph Vögele AG 2019; Laurila 2012, s. 315; Leica Geosystems AG 2013, s. 134 & 135; Topcon 2019 a-b; MOBA 2009 & 2006; A. Tulus, myyntipäällikkö, 8.10.2018, sähköpostihaastattelu). Ultraäänianturin mittaustarkkuus on

0,001 metriä, mutta keskiarvoistavan mittauksen vuoksi mittaustarkkuus on arviolta 0,002 metriä.

Jyrsinnässä ja tasauksessa merkittävänä pystysuuntaisen satunnaisvirheen lähteitä ovat tärinä, levittimen perän laskeminen tai nouseminen ja muut mahdolliset päällystystyökoneiden omasta järjestelmästä ja asfalttiryhmän toiminnasta aiheutuvat virheet. Opastavalla ja 3D-koneohjauksella toteutettujen kohteiden jyrsintäsyvyyksien poikkeamien keskihajonnat (kappale 1.3, taulukot 5 ja 7) ovat olleet välillä 0,004-0,04 metriä. On haastavaa arvioida jyrsinrummun tärinän osuutta kyseisten kohteiden keskivirheissä, mutta opastavalla koneohjauksella saavutettu noin 4 millimetrin keskivirhe kuvaa todennäköisesti sitä parhaiten. Tämä johtuu siitä, että opastavan koneohjauksen tuloksissa eivät vaikuta lähtötiedon absoluuttisen korkeusaseman tai takymetrimittauksen epätarkkuudet. Jyrsinkoneen oletettiin olevan hieman vanhempi (suuremmat välykset) ja tärinästä aiheutuvan pystysuuntaisen satunnaisvirheen menetelmän jyrsinnässä arvioitiin olevan 0,007 metriä sisältäen sivukaltevuusvirheen vaikutuksen. Tärinästä aiheutuva kohina sivukaltevuudelle on arviolta 0,1 %-yksikköä jyrsimelle.

Asfalttimassan levityksessä massan lämpötilan muutokset, massan laatuvirheet sekä perän täyttöasteen vaihtelut vaikuttavat levitetyn massan paksuuteen (Ala-Nissilä M., 5.2.2019, sähköpostikeskustelu). Esimerkiksi 50 celsiusasteen lasku lämpötilassa voi johtaa 25%:n virheeseen paksuudessa (4 cm -> 3 cm) (M. Ala-Nissilä, asiantuntija, 5.2.2019, sähköpostikeskustelu). Lisäksi jyrkissä käänöksissä voi syntyä merkittävää virhettä, jos massa jakautuu levittimen perässä epätasaisesti (M. Ala-Nissilä, asiantuntija, 5.2.2019, sähköpostikeskustelu). On myös mahdollista, että levitetty massa ei tartu jostain syystä alustaan ja liukuu levittimen mukana, mikä muuttaa levitetyn massan paksuutta (M. Ala-Nissilä, asiantuntija, 5.2.2019 sähköpostikeskustelu). Yllä mainitut levityksen virheet ovat kuitenkin karkeita virheitä ja ne ovat asfalttiryhmän hallittavissa: huolellinen työn suunnittelu sekä ohjeiden noudattaminen varmistavat laadukkaan lopputuloksen. Suhteellisen pienet lämpötilan vaihtelut (20 celsiusastetta) ovat kuitenkin kohtalaisen yleisiä (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 6.2.2019 haastattelu).

Asfalttinormeissa 4 cm:n paksuiselle päällysteelle (vakiopaksuinen laatta) on asetettu toleranssi, jonka mukaan yksittäinen poranäyte ei saa alittaa suunniteltua paksuutta 4 millimetrillä (PANK Ry 2017, s. 19). Asfalttinormien toleranssit on laadittu siten, että

päällystystyökoneilla on mahdollista saavuttaa toleranssit, kun töiden suunnittelussa, tuotannossa ja laadunvalvonnassa on toimittu ohjeiden mukaisesti (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 13.2.2019, haastattelu). Tasausmassan ja päällystelaatan levityksen keskivirheiden arvioitiin olevan 0,004 m sisältäen sivukaltevuusvirheen vaikutuksen. Tärinän aiheuttaman kohinan sivukaltevuudelle arvioitiin olevan 0,05 %-yksikköä asfaltinlevittimessä.

Laadunvarmistuksessa suoritettava sivukaltevuudenmittaus perustuu PTM-auton lasermittaukseen ja IMU-laitteeseen. Tien sivukaltevuus määritetään PANK-5209 -menetelmän mukaisesti regressiosuoralla (PANK ry 2004). Sivukaltevuuden määrittäminen laadunvarmistuksessa on periaatteiltaan hyvin samanlainen kuin lähtötieto- ja suunnitteluvaiheessa. PTM-autoilla saavutettavista sivukaltevuuden mittaustarkkuuksista (vertailu tosimitaan) ei ole tehty kattavaa tutkimusta tai niitä ei ole julkisesti saatavilla, mutta PTM-laatumittajien vertailumittaukset vuosilta 2013-2018 antaa osviittaa PTM-mittausten sivukaltevuuden tarkkuudesta: mittaajien toistettavuuden keskiarvo vuosina 2013-2018 pysyi alle 0,02 %-yksikössä ja uusittavuus alle 0,08 %-yksikössä uusia päällysteitä mitattaessa (Junes 2018). Sivukaltevuuden mittaustarkkuus on korkea (erinomainen toistettavuus), mutta poikkeavuudet mittaajien välillä (laitteet, laskentatavat, ajolinjat) johtavat heikompaan uusittavuuteen ja systemaattisiin eroavaisuuksiin (Dietrich 2009, s. 14). Satunnaisvirheiden tarkastelussa PTM-auton sivukaltevuuden mittaustarkkuuden arvioitiin olevan 0,08 %-yksikköä.

PANK-ohjeissa ei ole vaatimusta etäisyyden tai N,E-sijainnin satunnaisvirheelle, mutta virhetarkastelussa sen oletettiin olevan 0,5 metriä, joka on tyypillinen tarkkuus differentiaalisessa GNSS-mittauksessa (D-GNSS) (Ollikainen 2018, s. 11; Poutanen 2016, s. 258).

Takymetrien tarkkuus etäisyydenmittauksessa on 1-2 mm + 1-2 ppm ja kulmamittauksessa 0,3 milligoonia ($0,00027^\circ$), joten pituus- ja sivusuuntaisen sijainnin sekä korkeusaseman virheeksi laadunvarmistuksessa arvioitiin olevan 0,002 metriä (Leica Geosystems AG 2015a-b). YIV 11.2 -ohjeessa korkeusasema suositellaan mitattavaksi ainoastaan tien keskilinjalta (Marttinen 2018, s. 21).

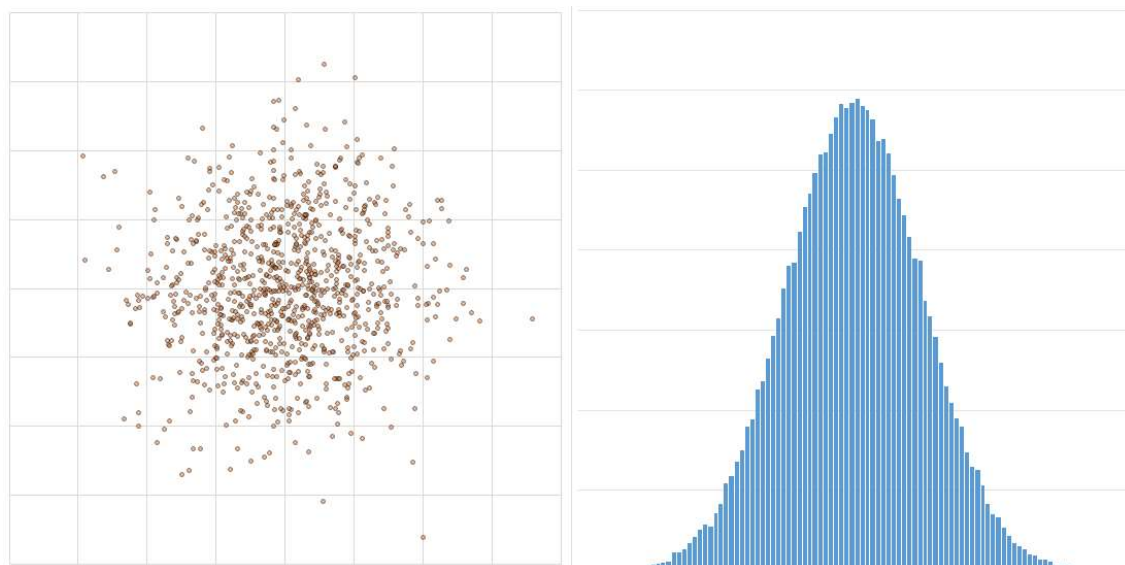
2.2 Empiiriset kokeet ja havainnoinnit

2.2.1 Ohjausmenetelmän satunnaisvirheiden selvittäminen

Työssä arvioitiin pinnasta ohjaavan koneohjausmenetelmän eri vaiheissa mahdollisesti syntyvien satunnaisten virheiden vaikutusta päällystystyön lopputulokseen. Virhetarkastelun kautta laskettiin todennäköisyydet tilaajan toleranssien saavuttamiselle. Eri vaiheissa muodostuvia satunnaisvirheitä selvitettiin seuraavista lähteistä:

- toteutetuista päällystyskohteista mitatun tiedon avulla (toteumatieto)
- mittalaitteiden valmistajilta saatavilla tiedoilla (tietolomakkeet)
- muista kirjallisuuslähteistä
- asiantuntijahaastatteluilla

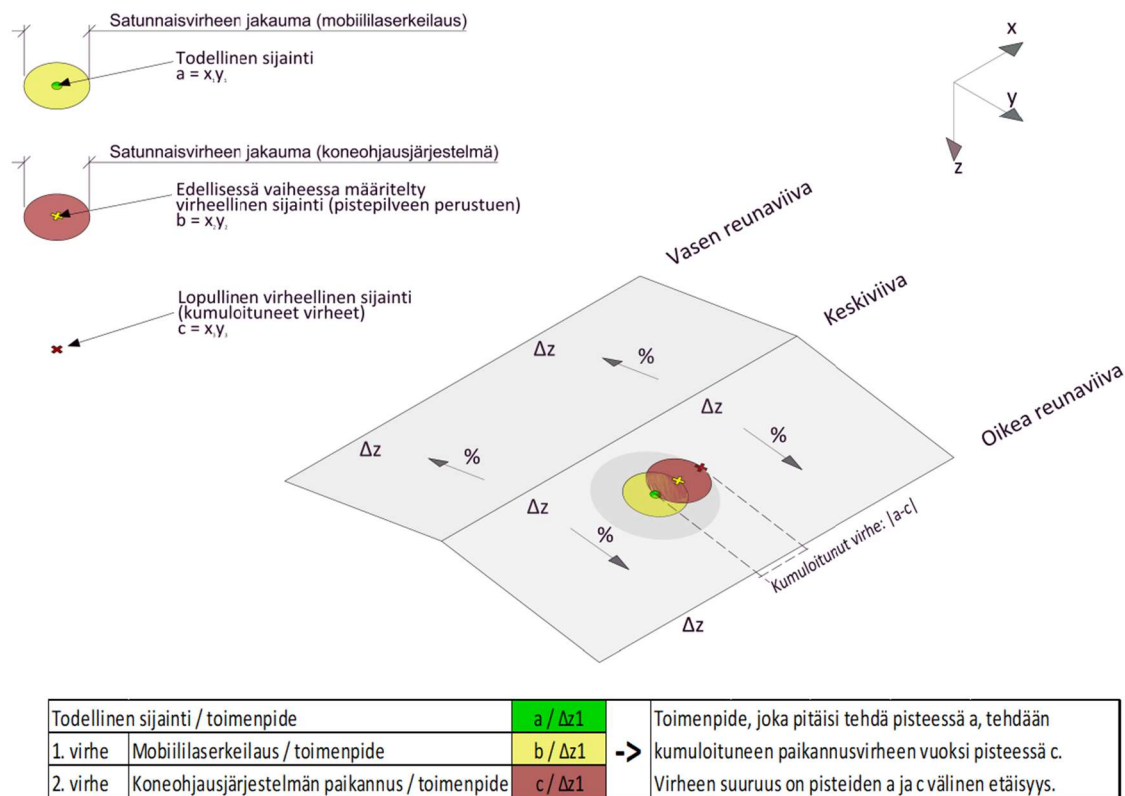
Virhetarkastelun satunnaisvirheiden oletettiin noudattavan mahdollisimman hyvin normaalijakaumaa (kuva 20). Tämä perustuu yleiseen olettamukseen, että niin GNSS-paikannus kuin muutkin mittaukset ovat stokastisia prosesseja ja niiden virhejakauma noudattaa mahdollisimman hyvin normaalijakaumaa (Gaussin kellokäyrä) (Vermeer 2018, s. 26 & 31; Laurila 2012, s. 36; van Diggelen 2007; Taylor 1997, s. 130). Täydellisesti normaalijakaumaa noudattava satunnaisvirhe voi saada arvoja nolasta äärettömään.



Kuva 20. Normaalijakautuneen satunnaisvirheen esitys pistekaaviolla ja histogrammilla.

Virheitä syntyy mallipohjaisen päällystyskorjauksen jokaisessa vaiheessa ja kaikki virhelähteet on tärkeää huomioida. Laadunvarmistuksessa tehtävien mittausten virhe ei

vaikuta lopullisen tien pinnan laatuun tai massamääriin, mutta toleranssien saavuttamiseen sillä on merkitystä. Kuvassa 21 on visualisoitu horisontaalisten virheiden kasautumista maksimi-minimi -menetelmällä mobiililaserkeilauksen ja koneohjausjärjestelmien paikannusvirheiden tapauksessa.



Kuva 21. Paikannusvirheiden kumuloituminen.

Laadunvarmistuksessa vertaillaan toteutunutta päällystettä suunniteltuun. Tämän vuoksi teoreettisessa tilanteessa, jossa laadunvarmistus toteutettaisiin virheettömästi, ainoa havaittava virhe prosessissa olisi toteutuksen aikainen paikannusvirhe. Suunnitelma oletettaisiin virheettömäksi sijaintitietojensa osalta. Tämän vuoksi laadunvarmistuksessa havaittu virhe “lankeaisi” toteutuksen syyksi, vaikka se olisi ollut virheetön ja virheen todellinen lähde tai osa siitä olisi lähtöaineistossa. Toteutuksessa ja laadunvarmistuksessa oletetaan suunnitelma “täydelliseksi”, mikä on perusteltua, sillä mobiililaserkeilauksen absoluuttinen taso (N,E) - ja suhteellinen tarkkuus ovat hyvin korkeita riippumatta siitä, että onko keilaus toteutettu signaloituna vai ilman.

Virhetarkastelussa kuitenkin oletettiin, että laadunvarmistus havaitsisi myös suunnitelman virheen. Tämä oletus tehtiin, jotta prosessin kaikki virheet tulisi huomioitua. Oletuksen myötä virhetarkastelussa arvioitu prosessin kokonaisvirhe on suurempi kuin mitä se olisi ilman lähtöaineiston virheiden huomioimista.

Työssä ei erikseen tarkasteltu systemaattisen virheen vaikutuksia päällystystyön lopulliseen pintaan. Systemaattinen virhe voi aiheutua esimerkiksi virheellisestä kalibroinnista tai kalibroinnin jälkeen tapahtuneista muutoksista mittauksen olosuhteissa (esimerkiksi takymetrin kolmijalan painuminen tai prisma-auvan kärjen kuluminen). Virhetarkastelun oletuksena oli, että mittalaitteet (laserkeilain, GNSS-vastaanottimet, kaltevuus- ja ultraäänianturit) olivat kalibroitu ennen mittausten suorittamista ja että merkittävimmät systemaattiset virheet havaittaisiin töitä tehdessä. Systemaattista virhettä voi mittauslaitteiden lisäksi aiheutua työkoneista. Esimerkiksi jyrsimen jyrsinpiikit voivat kulumisen vuoksi aiheuttaa pystysuuntaista systemaattista virhettä. Usein näihinkin virhelähteisiin voidaan kuitenkin vaikuttaa ennen töiden aloitusta ja töiden aikana tehtävillä kalibroinneilla.

Karkeita virheitä ei tarkasteltu laskennallisesti. Karkeita virheitä voi aiheutua esimerkiksi laitehäiriöstä, käyttäjän virheestä tai muusta harvinaisesta tapahtumasta. Tällaisia virheitä ei ole mielekästä laskennallisesti tarkastella, koska niiden todennäköisyyttä ja vaikutusta on hyvin vaikea arvioida. Tämän vuoksi niiden laskennallinen tarkastelu tuottaisi tuloksia, joihin liittyisi suurta epävarmuutta. Karkeita virheitä pyritään estämään työmaalla erinäisin toimin, kuten tarkkailemalla ympäristöstä mahdollisia häiriötekijöitä ja suojaamalla komponentteja koteloinnilla. Tilastotieteissä ja todennäköisyysteoriassa on olemassa heuristinen sääntö (”nyrkkisääntö”), jonka mukaan normaalisti jakautunut satunnaissuure ei juuri koskaan ole suurempi kuin kolme kertaa keskivirhe (Vermeer 2018, s. 33; Encyclopedia of Mathematics 2018). ”Kolmen sigman sääntö” voi toimia rajanvetona satunnaisten ja karkeiden virheiden välillä.

Tarkastelussa virheitä analysoitiin laatukriteereiden eli toleranssien kautta, joita tilaaja asettaa päällystystyön lopputulokselle. Nykyiset käytössä olevat laatukriteerit voidaan jakaa uusien teiden ja tietomallipohjaisesti korjattujen teiden päällysteitä koskeviksi kriteereiksi. Uusien teiden päällysteitä koskevat laatukriteerit (taulukko 9) on määritelty Päällystealan neuvottelukunnan (PANK ry) Asfalttinormit 2017 –julkaisussa, johon myös Infrarakentamisen yleisissä laatuvaatimuksissa (InfraRYL) viitataan.

Taulukko 9. Uusien teiden päällysteeseen liittyviä laatukriteereitä (PANK ry, Asfalttinormit 2017)

Sivukaltevuus	Moottori- ja moottoriliikennetiet	Max. +/- 0,3 %-yksikön poikkeama suunnitellusta
	Muut valta- ja kantatiet	Max. +/- 0,5 %-yksikön poikkeama suunnitellusta
	Seutu- ja yhdystie	Max. +/- 0,7 %-yksikön poikkeama suunnitellusta
Korkeusasema		Max. +/- 20 mm poikkeama suunnitellusta
Tasaisuus		IRI / IRI4

Tietomallipohjaisissa päällysteen korjaushankkeissa laadunhallinnan toimenpiteinä on mitattu tien sivukaltevuus sekä verrattu toteutuneita massamääriä suunniteltuihin. IRI:ä tai korkeusasemaa ei ole mitattu päällystystöiden jälkeen, mutta ne ovat esitetty automaattisen ja opastavan koneohjauksen laatuvaatimuksissa YIV-ohjeissa (Marttinen 2018, s. 21). Mittaus- tai ohjaustarkkuudelle ei ole määritetty toleransseja.

Virhetarkastelussa huomioitiin sivukaltevuuden ja korkeusaseman toleranssit. IRI-arvoja eli tasaisuutta ei arvioitu. IRI-mittaukseen on viime aikoina suhtauduttu kriittisesti ja siitä ollaan luopumassa tiestön kunnon arvioinnissa (K. Eskola, asiantuntija, 21.9.2018, kokous; Alanaatu et al. 2016). IRI:n heikkoutta kuntoparametrina on tuotu esille myös muun muassa Maintenance BIM 2012-2013 -tulosraportissa ja Liikenneviraston selvityksessä ”Tien epätasaisuustunnusluvun kehittäminen” (Heikkilä & Marttinen 2014, s. 48; Alanaatu et al. 2016, s. 87). Sen korvaajaksi on kaavailtu monipuolisempaa RIDE-ajoneuvomallia (K. Eskola, asiantuntija, 21.9.2018, kokous; Alanaatu et al. 2016).

Korkeusaseman huomiointi virhetarkastelussa oli teoreettista: käytännössä sitä ei mitattaisi suhteellisesti tarkkaan lähtöaineistoon perustuvassa päällystystyössä, sillä laadunvarmistuksessa mitattua korkeusasemaa ei olisi mielekästä verrata suunnitelmaan tai koneohjausmalliin. Lisäksi uudella korkeusasemalla ei ole juurikaan merkitystä päällysteen korjauksessa.

2.2.2 Ohjausmenetelmän taloudellisuuden selvittäminen

Menetelmän taloudellisuutta tarkasteltiin vertailemalla sitä nykyisiin päällysteen korjauksessa käytettyihin menetelmiin. Tarkastelussa arvioitiin prosessin niitä vaiheita, joissa pinnasta ohjaava menetelmä poikkeaa nykyisistä päällysteen korjauksen menetelmistä. Lisäksi arvioitiin koneohjausjärjestelmän komponenttien kustannuksia. Laadunvarmistuksen kustannuksia ei tarkasteltu. Taloudellisuuden selvittäminen rajautui

lähtötieto-, suunnittelu- ja toteutusvaiheisiin. Taloudellisuuden arvioinnissa hyödynnettiin toteutuneiden päällysteen korjauskohteiden kustannustietoja sekä asiantuntijoiden kokemuksia ja arvioita.

2.2.3 Ohjausmenetelmään soveltuvan koneohjausmallin kehitys

Suunnittelukokeessa kehitettiin FMI:n suunnittelun työtapoja sellaisiksi, että menetelmän vaatimat koneohjausmallit saadaan mahdollisimman sujuvasti tuotettua. Toteutusmalli ja siitä muodostettu koneohjausmalli tulivat vastaamaan toteutus- ja koneohjausmenettelyn vaatimuksia. Tuloksista arvioitiin menetelmän aiheuttamaa lisätyötä suunnittelussa verrattuna nykyisiin menetelmiin ja toteutuskelpoisuutta.

Koneohjausmallin kehitys toteutettiin Finnmap Infran Oy:n suunnittelijoiden kanssa käyttäen Excel-, Microstation- ja Inroads-ohjelmistoja. Lisäksi suunnittelukokeesta järjestettiin työpaja FMI:n suunnittelijoiden kesken.

3 TULOKSET

3.1 Laskennalliset tarkkuudet eri vaiheissa

Kuvassa 21 (paikannusvirheen kumuloituminen, kappale 2.2.1) esitettiin, miten mittausten satunnaisvirheet voivat kasautua (edetä) prosessissa. Toisin sanoen, kaikkien eri vaiheissa (lähtötieto, suunnittelu, toteutus, laadunvarmistus) suoritettujen mittausten virheet vaikuttavat lopulliseen tulokseen. Tätä satunnaisvirheiden kasautumista prosessissa voidaan matemaattisesti käsitellä eri tavoilla, kuten maksimi-minimi -virhearviolla tai keskivirheen kasautumislaila (virheen etenemislaki) (Taylor 1997, s. 23 & 75). Maksimi-minimi -menetelmässä lopullisen tuloksen epävarmuus muodostuu sitä edeltäneiden mittausten epävarmuuksien summasta:

Olkoon funktio $q = q(x_1 \dots x_m)$ mitattujen arvojen $x_1 \dots x_m$ summa

$$q = \sum_{i=1}^m x_i \quad (1)$$

Arvojen $x_1 \dots x_m$ mittaukset ovat toisistaan riippumattomia ja niihin liittyvät keskivirheet $\delta x_1 \dots \delta x_m$ ovat täysin satunnaisia. Tällöin prosessin keskivirhe maksimi-minimi -menetelmässä lasketaan kaavalla

$$\delta q = \sum_{i=1}^m \delta x_i \quad (2)$$

Menetelmän etuna on se, että tulokset ovat ”turvallisia”, sillä prosessissa muodostuva virhe ei koskaan ylitä maksimi-minimi -menetelmällä arvioitua virhettä. Lisäksi etuna on menetelmän helppokäyttöisyys. Usein prosessin virhe on kuitenkin pienempi kuin siinä suoritettujen mittausten epävarmuuksien summa, joten maksimi-minimi -menetelmä ylikorostaa epätarkkuuksien vaikutusta prosessissa. (Taylor 1997, s 24)

Keskivirheen kasautumislaki kuvaa prosessin virhettä usein realistisemmin ja on siksi useimmissa tapauksissa parempi menetelmä virheanalyysiin. Keskivirheen kasautumislaki antaa prosessille aina pienemmän arvon kuin maksimi-minimi -virhearvio, sillä kasautumislaila keskivirheet summataan neliöllisinä yhteen ja summasta lasketaan neliöjuuri (Taylor 1997, s. 60):

$$\delta q = \sqrt{\sum_{i=1}^m \delta x_i^2} \quad (3)$$

Edellytys menetelmän käytölle on se, että mittaukset ovat toisistaan riippumattomia ja satunnaisia (Taylor 1997, s. 60). Nämä ehdot toteutuvat tietomallipohjaisen päällystystyössä eri vaiheiden välisissä mittauksissa, ja koska menetelmällä saadaan realistisempi virhearvio prosessista kuin maksimi-minimi -menetelmällä, sitä päädyttiin käyttämään tämän työn virhetarkastelussa.

Taulukossa 10 on esitetty tilaajan toleranssit lopulliselle päällysteelle. Mittaus- ja ohjaustarkkuudelle ei ole asetettu vaatimuksia tietomallipohjaisessa päällysteen korjauksessa.

Taulukko 10. Toleranssit lopullisen päällysteen korkeusasemalle ja sivukaltevuudelle. (Marttinen 2018, s. 21; PANK ry 2017, s. 24)

Valmiin päällysteen toleranssit*	
Sivukaltevuus	Max. ± 0,3 / 0,5 / 0,7 %-yksikön poikkeama suunnitellusta
Korkeusasema	Max. ± 20 mm poikkeama suunnitellusta
* Toteutusta ohjaavia (mittaus-/ohjaustarkkuus) toleransseja ei ole asetettu koneohjatulle päällystystyölle	

Taulukossa 11 ovat kaikki prosessin virhelähteet, jotka esitettiin kappaleessa 2.1.5. Taulukossa 12 ovat prosessin kokonaisvirheet keskivirheen kasautumislailalla laskettuna sekä todennäköisyydet korkeusasema- ja sivukaltevuustoleranssien saavuttamiselle. Kaistalla yksittäisen poikkileikkauksen pisteen kohdalla on vain joko jyrskintää tai tasausta, joten niistä aiheutuvia virheitä käsiteltiin erikseen. RTK-GNSS:n paikannuksen keskivirhe on erittäin pieni ja virhetarkastelussa oletettiin, että paikannusvirhe ei vaikuta korkeusaseman tai sivukaltevuuden virheisiin (ohjausarvojen lukeminen väärästä paikasta).

Taulukko 11. Pinnasta ohjaavan menetelmän lähtötieto-, toteutus ja laadunvarmistusvaiheiden virheet. Luvut ovat keskivirheitä (1 keskihajonta).

	Pituussuuntainen [m]	Sivusuuntainen [m]	Pystysuuntainen* [m]	Kaltevuusvirhe* [%-yksikköä]
Lähtötiedot (ja suunnittelu)	0,02 ⁽¹⁾	0,02 ⁽¹⁾	0,003	0,02
Toteutus	0,02 ⁽¹⁾	0,02 ⁽¹⁾	0,002 ⁽⁴⁾ 0,007 ⁽⁵⁾ / 0,004 ⁽⁵⁾ 0,004 ⁽⁶⁾	0,1 ⁽⁴⁾ / 0,05 ⁽⁴⁾ 0,1 ⁽⁵⁾ / 0,05 ⁽⁵⁾ 0,05 ⁽⁶⁾
Laadunvarmistus	0,002 ⁽²⁾ 0,5 ⁽³⁾	0,002 ⁽²⁾ _ ⁽³⁾	0,002 ⁽²⁾ _ ⁽³⁾	_ ⁽²⁾ 0,08 ⁽³⁾
1. RTK-GNSS 2. Laadunvarmistus takymetrillä. 3. Laadunvarmistus PTM-autolla. PTM-auton paikannus DGNS:llä. 4. Ultraääni-/sivukaltevuusanturin tarkkuus (koneohjattu jyrsin/levitin) 5. Päälystystyökoneen (Jyrsin/levitin) tärinästä ym.. aiheutuva epätarkkuus työstöterälle 6. Vakiopaksuisen laatan levityksen ja tiivistämisen epätarkkuus. * Sivukaltevuuden ja pystysuuntaisen virheen keskinäinen riippuvuus on huomioitu arvoissa.				

Taulukko 12. Pinnasta ohjaavan menetelmän kokonaisvirheet satunnaisvirheiden kasautumislaililla laskettuna ja toleranssin ylityksen todennäköisyys.

	Korkeusasema [m]		Sivukaltevuus [%-yksikkö]	
	Jyrsinnän kohdalla	Tasauksen kohdalla	Jyrsinnän kohdalla	Tasauksen kohdalla
Odotusarvo*	0	0	0	0
Keskivirhe	0.009	0,007	0,17	0,12
Todennäköisyys toleranssin saavuttamiselle	97,37 %	99.57 %	92,24 % ⁽¹⁾ 99,67 % ⁽²⁾ 100 % ⁽³⁾	98,76 % ⁽¹⁾ 100 % ⁽²⁾ 100 % ⁽³⁾
* Oletettu, että ei systemaattista virhettä 1. Moottori- ja moottoriliikennetiet 2. Muut valta- ja kantatiet 3. Seutu- ja yhdystie				

3.2 Taloudellisuuden tarkastelun tulokset

Pinnasta ohjaava menetelmä tuo kustannussäästöjä lähtötieto- ja toteutusvaiheeseen, kun sitä verrataan automaattiseen 3D-koneohjaukseen. Opastavaan koneohjaukseen verrattuna menetelmä on toteutusvaiheen kustannuksiltaan korkeampi, mutta toisaalta lopputuloksena voidaan saavuttaa paremmin suunnitelmien mukaiset massamäärät sekä vältetään laatuvirheitä, jotka osaltaan voivat nostaa kustannuksia.

Lähtötietojen osalta pinnasta ohjaavassa menetelmässä muodostuu kustannuksia yhtä paljon kuin opastavassa koneohjauksessa, sillä vaiheet ovat niiltä osin täysin samat. Molemmissa menetelmissä signaloinnin jättäminen on merkittävä kustannussäästö verrattuna automaattiseen 3D-koneohjaukseen. Signaalipisteet pistepilven sovitukseen

mitataan takymetrilla tai tarkkavaaituksilla, mikä on aikaa vaativaa kenttätyötä ja siten suhteellisen korkeakustanteinen työvaihe, vaikka signaalipisteet rakennettaisiinkin mobiililaserkeilauksen yhteydessä. YIV 11.2. -ohjeessa suositellaan signaalipisteiden väliseksi maksimietäisyydeksi 100 metriä ajoradalla, mikä esimerkiksi 10 kilometrin kohteella tarkoittaa noin 100 mittausta.

Pistepilven hankintakustannusten arvioinnissa käytettiin todellista Finnmap Infran suunnittelemaa noin 32 kilometriä pitkä kohdetta, josta oli pyydetty tarjoukset sekä signaloidusta että signaloimattomasta mobiililaserkeilauksesta. Mobiililaserkeilaus ilman signaalipisteitä olisi maksanut n. 14 000 euroa, kun taas signaloitu (signaalipisteet 50 metrin välein) olisi maksanut n. 38 000 euroa. Signaalipisteiden tekeminen olisi kyseisessä kohteessa nostanut kustannuksia 24 000 euroa. Tarjoukset osoittavat takymetrimittauksen /tarkkavaaituksen olevan hyvin kallista suhteessa mobiililaserkeilauksen kokonaiskustannuksiin. Myös muissa kohteissa signaalipisteiden kustannusvaikutus on ollut samaa suuruusluokkaa, vaikkakin useilla tekijöillä on vaikutusta kustannuksiin, kuten (P. Mero, toimitusjohtaja, 23.1.2018, sähköpostikeskustelu; L. Hartikainen, toimitusjohtaja, 13.12.2018, sähköpostikeskustelu):

- kuinka hyvin mittaukset saadaan limitettyä muiden mittauskohteiden kanssa
- signaalipisteiden välinen maksimietäisyys
- mitataanko samalla tukipisteitä ja kuinka paljon
- kohteen pituus
- tarvitaanko turva-autoa ja erillisiä liikennejärjestelyjä

Suunnitteluvaiheessa pinnasta ohjaava koneohjaus ei poikkea nykyisistä menetelmistä merkittävästi, joten suunnittelusta aiheutuvat kustannukset pysyvät samoina. Suunnittelussa luodaan erilliset levitetyt osamallit taiteviivoille (keski- ja reunaviivat) sekä sivukaltevuusmalli (katso kappale 3.3). Tämä tuo suunnitteluun lisätyötä nykyisiin menetelmiin nähden, mutta työn määrä on suunnittelun kokonaiskustannusten kannalta hyvin pieni.

Toteutuksessa on useita kustannuksia alentavia tekijöitä verrattuna 3D-koneohjaukseen takymetrillä, mutta kenties merkittävin kustannusero tulee työntekijöiden määrästä: 3D-takymetriohjauksessa tarvitaan vähintään yksi mittamies suunnittelemaan takymetriensä paikat ennen toteutusta (työsuunnitelma) sekä operoimaan (siirtely ja orientointi) niitä

päällystystyön aikana, kun taas RTK-mittauksessa ylimääräistä mittamiestä ei tarvita tai hänen työmääränsä on pienempi. Lisäksi takymetriohjauksessa on suurempi paikannukseen liittyvien häiriöiden riski: takymetri – prisma -näkölinjan estyminen tai takymetrin liikkuminen orientoinnin jälkeen voi aiheuttaa viivästyksiä ja laatuvirheitä, jotka taas aiheuttavat ylimääräisiä kustannuksia.

Sekä 3D-koneohjaukseen että opastavaan koneohjaukseen verrattuna pinnasta ohjaavalla koneohjauksella saavutetaan mahdollisesti nopeampi ajonopeus jyrseissä, sillä GNSS-paikannuksessa vastaanottimen nopeutta ei tarvitse rajoittaa samalla kuin prisman nopeutta takymetriohjauksessa. Opastavassa koneohjauksessa ajonopeutta rajoittaa koneenkuljettajan kyky ohjata jyrseä ohjausarvojen mukaan. Nopeampi ajonopeus tehostaa työtä ja vähentää työntekijöistä (asfalttiryhmä, kuljetusautot) aiheutuvia muuttuvia kustannuksia. Asfaltinlevittimen ajonopeudessa ei ole eroja perinteisen ja koneohjausmenetelmien välillä (M. Marttinen, yksikönpäällikkö, 7.1.2019, haastattelu).

Perinteisessä jyrseissä ajonopeus on suurempi kuin koneohjausmenetelmissä, mutta ajonopeutta parempi työn tehon mittari on työnopeus. Työnopeus on päällystyskohteessa kulunut kokonaisaika suhteessa kohteen pituuteen tai alaan. Perinteisessä jyrseissä työnopeuteen vaikuttavat laskevasti lukuisat pysähdykset ja uudelleen jyrseät/levitykset, joita joudutaan tekemään epätarkan toteutuksen vuoksi. Tällaisia pysähdyksiä tulee huomattavasti vähemmän koneohjatussa työssä (Marttinen & Heikkilä 2014, s. 46; V.-M. Tanhuanpää, market segment manager, 10.1.2019, haastattelu).

RTK-mittauksessa ei ole rajoitetta päällystystyökoneiden yhtäaikaiseen käyttöön toisin kuin takymetriohjauksessa, jossa yksi takymetri voi ohjata vain yhtä työkonetta kerrallaan. Tästä on etua kohteissa, joissa päällystystyö täytyy suorittaa mahdollisimman nopeasti ja on mahdollisuus käyttää useampaa kuin yhtä päällystystyökonetta. 3D-koneohjauksessa useamman kuin yhden työkoneen ohjaus saman aikaisesti vaatisi enemmän takymetrejä ja olisi työteknisesti haastavampaa, sillä takymetrit tulisi sijoittaa hyvin tarkasti häiriöiden välttämiseksi. Lähes rinnakkain kulkevat työkoneet ja niiden edellä kulkevat kuljetusautot voivat katkaista takymetrin ja prisman näkölinjan. Useamman kuin yhden työkoneen yhtä aikainen ohjaus tuo kustannussäästöjä muun muassa liikennejärjestelyjen vähentymisen myötä sekä mahdollistaa aikakriittisten kohteiden nopeamman toteutuksen. Esimerkiksi lentokenttien kiitoradat ovat kohteita, joissa on usein tärkeää minimoida työhön käytetty kokonaisaika. Normaalin

lentotoiminnan keskeytymisestä aiheutuvat kustannukset ja haitat voivat olla suuremmat kuin nopeammasta toteutuksesta syntyvät lisäkustannukset (Trimble 2019a-c).

Pinnasta ohjaavassa menetelmässä jatkuva toteumatiedon mittaaminen päällystystyökoneen etu- ja takaosan ultraäänianturien avulla voi tehdä tarpeettomaksi erilliset tarkemittaukset takymetrillä tai laserkeilaimella. Näin voidaan saada huomattavia aika- ja kustannussäästöjä muihin menetelmiin verrattuna (Olli 2017, s. 4).

Koneohjausjärjestelmän komponentit ovat halvempia pinnasta ohjaavassa koneohjauksessa kuin takymetriohtajassa 3D-koneohjausjärjestelmässä, sillä siinä komponenttien kustannukset ovat karkeasti arvioiden 70 – 200 % korkeammat (J. Paitsola, osastopäällikkö, 20.12.2018, sähköpostikeskustelu). Automaattinen 3D-koneohjaus vaatii vähintään kaksi robottitakymetria sekä aktiiviprismat, kun taas tienpinnasta automaattisesti ohjatussa järjestelmässä näiden sijasta on 2 ultraäänianturia, GNSS-vastaanotin ja -antenni sekä fyysinen tai virtuaalinen RTK-tukiasema. Menetelmien koneohjausjärjestelmiä yhdistäviä komponentteja ovat tietokone ja näyttö, sivukaltevuusanturi sekä tarvittavat kaapeloinnit ja kytkentärasiat.

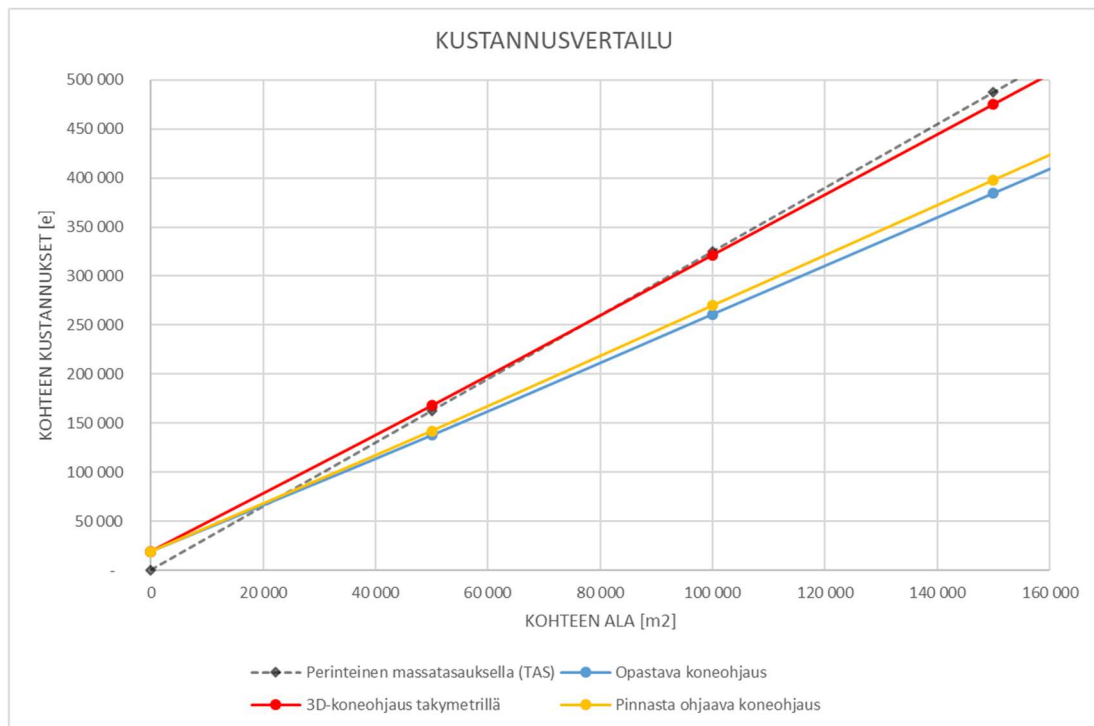
Taulukossa 13 on esitetty suurpiirteinen esimerkkilaskenta 100 000 m²:n päällysteenkorjauskohteen kustannuksista perinteisellä menetelmällä ja koneohjauksella (opastava/automaattinen/pinnasta ohjaava). Massatasauksen kesimääräiseksi levitysmääräksi asetettiin 50 kg/m². On kuitenkin hyvin vaikea tehdä vertailuja perinteisen ja koneohjausmenetelmien välillä, sillä menetelmät eivät ole vertailukelpoisia korjaustoimenpiteiden poikkeavien tavoitteiden vuoksi. Suoraviivainen kustannusten vertailu automaattisen 3D-koneohjauksen ja suhteelliseen ohjaukseen perustuvien menetelmien välillä ei ole myöskään täysin ongelmaton, sillä absoluuttisesti tarkkaan lähtöaineistoon perustuvalla 3D-koneohjauksella on paremmat vaikuttamismahdollisuudet suunnittelussa (ei rajoitusta tasauksen pituuteen).

Jyrsinnän ja tasauksen suhde esimerkkilaskennan koneohjatuissa menetelmissä on 50/50 [%/%], mutta todellisuudessa se vaihtelee kohteittain. Tasauksen suurempi osuus pienentää koneohjauksella saavutettavia kustannussäästöjä. Pinnasta ohjaavan menetelmän osalta on oletettu koneohjauksen vaativan erillisen mittamiehen (100 e/h), vaikka sen tarpeellisuudesta ei ole varmuutta. Lisäksi menetelmän ajo- ja työnopeus on oletettu samaksi kuin opastavassa koneohjauksessa. Koneohjausjärjestelmä (RTK-GNSS) oletettu 50% halvemmaksi kuin takymetriohtajauksessa.

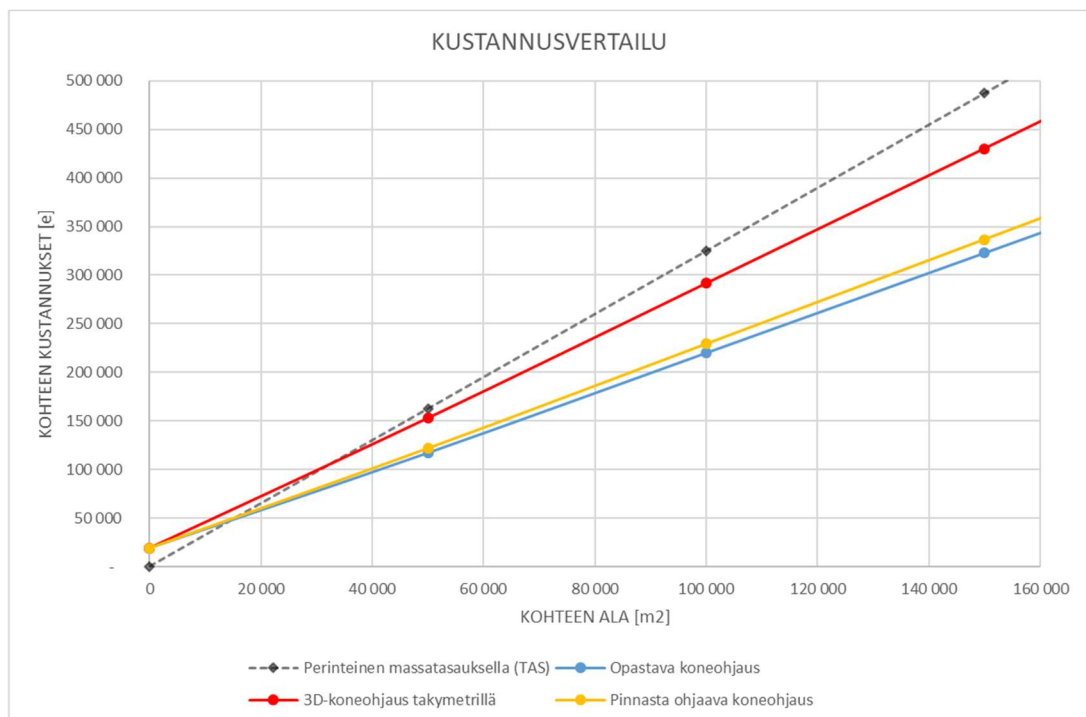
Taulukko 13. Vertailulaskenta perinteisen menetelmän ja koneohjauksen materiaali- ja kustannuseroista. Massatasaus ei ole täysin vertailukelpoinen koneohjausmenetelmien kanssa poikkeavien tavoitteiden vuoksi. Tasauksen ja jyrsinnän suhde koneohjausmenetelmissä on 50/50 [%/%].

Kohteen ala: 100 000 m ²	Perinteinen massatasaus (TAS)	Opastava koneohjaus	Automaattinen 3D-koneohjaus	Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan
Lähtötiedon ja suunnittelun hinta [e]	0	29 000	44 000*	29 000
Tasauksen hinta ⁽¹⁾⁽³⁾ [e/m ²]	3.25	3.33	3.50	3.40
Jyrsinnän hinta ⁽²⁾⁽³⁾ [e/m ²]	1.00	1.27	2.00	1.37
Tasauksen määrä [m ²]	100 000	50 000	50 000	50 000
Jyrsinnän määrä (TJYR) [m ²]	0	50 000	50 000	50 000
KUSTANNUKSET [e]	325 000	258 000	319 000	267 000
Ero perinteiseen [e]		-67 000 (- 21 %)	-6 000 (- 2 %)	-58 000 (- 18 %)
<ol style="list-style-type: none"> 1. Hinta levitettyinä, levityshintaan laskettu mukaan muuttuvat (esim. työtunnit) ja muuttuviksi muunnetut kiinteät kulut (esim. investoinnit koneisiin). Tasausmäärä on keskimäärin 100 kg/m². 2. Hinta kokonaisuudessaan, jyrsintahintaan laskettu mukaan muuttuvat ja muuttuviksi muunnetut kiinteät kulut. 3. Koneohjaus tuo lisäkustannuksia laiteinvestointien/-vuokrauksen ja erillisten mittamiesten vuoksi. <p>* Sisältää signaloinnin kustannuksen mobiililaserkeilauksessa.</p>				

Kustannuslaskelmia tehtiin myös eri kokoisille kohteille, jolloin havaittiin, että automaattinen 3D-koneohjaus osoittautuu perinteistä kalliimmaksi, kun kohde on tarpeeksi pieni (kuva 22). Tämä johtuu tasausmassasta aiheutuvien kustannusten osuuden pienenemisestä eli vaikutus on sama kuin tasauksen ja jyrsinnän suhteiden muuttamisessa (kuva 23). Lisäksi koneohjausmenetelmistä aiheutuvien peruskustannusten (kohteen koosta riippumattomien kustannusten) vuoksi ne ovat perinteistä menetelmää kalliimpia tietyn kokoisilla kohteilla.



Kuva 22. Perinteisen ja koneohjausmenetelmien kustannusten muodostuminen kohteen alan funktiona, kun tasauksen ja jyrsinnän suhde koneohjaus-menetelmissä on 50/50 [%/%].



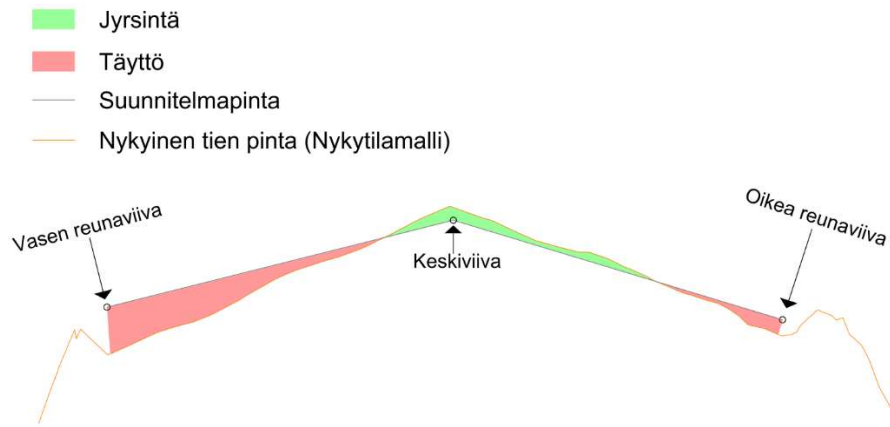
Kuva 23. Perinteisen ja koneohjausmenetelmien kustannusten muodostuminen kohteen alan funktiona, kun tasauksen ja jyrsinnän suhde koneohjaus-menetelmissä on 30/70 [%/%].

3.3 Koneohjausmallin kehittämisen tulokset

Menetelmää kehitettäessä huomattiin siihen liittyvän tietty erityispiirre sivukaltevuustietojen käsittelyn osalta: kun toteutetaan automaattinen 3D-koneohjaus, sivukaltevuustietoja ei tarvitse yleensä toimittaa erikseen urakoitsijalle, sillä absoluuttisesti tarkassa toteutuksessa sivukaltevuus määrittyy globaalissa koordinaatistossa tarkasti ilmoitettujen tai annettujen taiteviivojen korkeusasema-erojen kautta. Koneohjausjärjestelmä lukee jyrsinrummun tai ohjauspalkin ohjausviivan kohdalta 3D-koneohjausmallin sivukaltevuuden ja asettaa ohjausviivan mallin mukaiseen korkeusasemaan. Pinnasta ohjaavassa koneohjauksessa ei voida tällä tavalla toimia, sillä työstökorkeus annetaan suhteessa olemassa olevaan pintaan vain taiteviivan kohdalla, jolloin siihen ei sisälly kaltevuustietoa. Ongelman voi ratkaista ainakin kahdella eri menetelmällä: nykytila- ja toteutusmallin välinen erotus -ratkaisu sekä osamalliratkaisu.

3.3.1 Eromalli-menetelmä

Suunnitteluvaiheessa korjattavasta päällysteestä laaditaan kolmioverkko-muotoinen nykytilamalli, jonka suhteen luodaan suunnitelmamalli/-pinta. Molemmat mallit ovat absoluuttisen korkeusaseman suhteen epätarkkoja, mutta suhteessa toisiinsa erittäin tarkkoja. Tämän mahdollistaa sen, että koneohjausjärjestelmälle voidaan toimittaa molemmat mallit, joista järjestelmä määrittää jyrsinnän tai tasauksen työstösyvyyden mallien korkeusasemien erotuksen perusteella (kuva 24). Sivukaltevuus muodostuu suoraan suunnitelmamallista (taiteviivojen korkoero / taiteviivojen vaakaetäisyys). Menetelmässä suunnittelijan ei tarvitse tuottaa erikseen koneohjausta varten mitään sellaista mallia, jota suunnittelussa ei olisi jo tehty. Tosin, on mahdollista, että jyrsinnälle ja massatasaukselle on tarpeellista luoda omat pintamallit. Topconin Smoothride -järjestelmän ohjaus perustuu eromalli-menetelmään.



Kuva 24. Eromalli-menetelmän visualisointi poikkileikkauksessa. Ympyrät osoittavat taiteviivojen sijainnin.

Kuvasta 24 näkee selkeästi, miten suunnitelmapinnan ja nykyisen pinnan välinen etäisyys vaihtelee poikkileikkauksessa tien sivusuunnassa: sivusuuntainen paikannusvirhe voi aiheuttaa työstösyvyydessä merkittävää virhettä. Taulukkoon 14 on koottu eromalli-menetelmän edut ja haasteet.

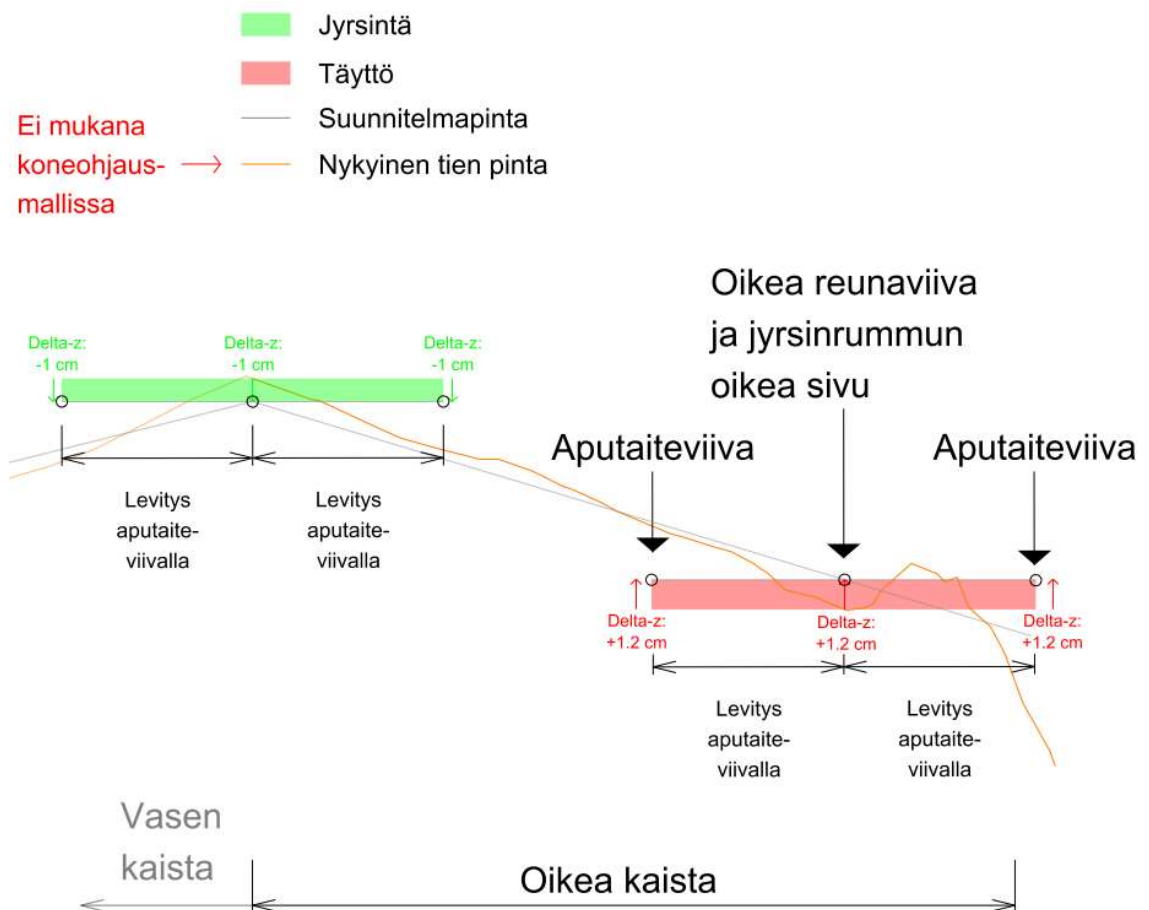
Taulukko 14. Eromalli-menetelmän edut ja haasteet.

Eromalli-menetelmä	
Edut	Haasteet
<ul style="list-style-type: none"> - Ei vaadi ylimääräistä työtä suunnittelijalta <ul style="list-style-type: none"> • Toimittaa sen, mitä täytyy joka tapauksessa tehdä - Helppo ymmärtää työmaalla (visualisointi) <ul style="list-style-type: none"> • Riski valita väärä malli työmaalla on pieni - Ei tarvitse erillisiä ohjauksen taiteviivoja, suhteellista korkeutta mittaavan anturin ei tarvitse olla juuri siellä missä pitääkin - Ei tarvitse erillistä sivukaltevuustiedostoa 	<ul style="list-style-type: none"> - Riippuvainen erittäin tarkasta RKT-GNSS-paikannuksesta - Nykytilamalli on erittäin raskas ja voi aiheuttaa haastetta työkonneissa / laskennassa. Vaihtoehtoisesti pinnan harvennus voi aiheuttaa epätarkkuutta.

3.3.2 Osamalli-menetelmä

Taiteviiva- ja sivukaltevuusmallissa luodaan reuna- ja keskiviivoille taiteviivamallit. Erona eromalli-ratkaisuun on kuitenkin se, että jyrsinrummun tai ohjauspalkin työstösyvyyttä ohjataan vain toisella sivulla. Sivukaltevuuden ohjausarvot luetaan suunnitelmapinnasta kuten eromalli-menetelmässä (kuva 25). Työstösyvyyden ohjausarvot ovat nolla-korkeusaseman alapuolella jyrsinnässä ja yläpuolella täytössä (kuvat 25 ja 26). Osamalli-menetelmässä koneenkuljettaja valitsee ennen työn aloitusta

oikeat tiedostot. Esimerkiksi tilanne, jossa päällystystyö aloitetaan (ensimmäinen ”veto”) tien oikealta reunaviivalta, koneenkuljettaja valitsee koneohjausjärjestelmän näytöltä oikeaa reunaviivaa vastaavan taiteviivamallin ja sivukaltevuustiedoston. Kaistan toisesta vedosta alkaen jyrsinrumpu tai ohjauspalkki asetetaan ”nollakorkoon”, eikä työstötasoa tarvitse lukea ohjausmallista. Koneohjausjärjestelmä lukee sivukaltevuuden kuitenkin edelleen suunnitelmapinnasta.



Kuva 25. Taiteviiva ja sivukaltevuusmalli -ratkaisu (poikkileikkaus). Suorakulmiot esittävät keskiviivan ja oikean reunaviivan eromalleja, joista koneohjausjärjestelmä laskee työstösyvyyden. Ympyrät osoittavat taiteviivojen sijainnin. Koneohjausjärjestelmä lukee sivukaltevuuden suunnitelmapinnasta.



Kuva 26. Taiteviiva ja sivukaltevuusmalli -ratkaisu (pituusleikkaus). Taiteviiva ”aaltoilee” nollatason molemmiin puolin.

Kuten poikkileikkauksista (kuva 25) näkee, niin reunaviivan ja keskilinjan taiteviivalle on molemmiin puolin aputaiteviivat. Aputaiteviivat ”levittävät” oikean reunaviivan, sillä niillä on samat ohjausarvot kuin varsinaisesta reunaviivasta tehdylle taiteviivalla. Tämän vuoksi mahdollinen satunnainen tai systemaattinen paikannusvirhe tien sivusuunnassa ei johda väärään ohjausarvoon jyrksinnässä tai levityksessä. Koneenkuljettaja ohjaa työkoneen liikkumista seuraten tiemerkinä, joten virheellinen paikannus vaikuttaa ainoastaan työkoneen sijaintiin koneohjausmallissa. Sivusuuntaisen virheen eliminoinnin lisäksi menetelmän etuna on se, että ultraääniantureita tarvitaan ainoastaan toisella puolella päällystystyökonetta koneohjauksessa.

Osamalli-menetelmässä on tärkeää, että koneohjausmallin taiteviivat ovat samalla kohdalla kuin tien pinnan tasoa mittaavan ultraäänianturin mittausalue, koska koneohjausmallissa ”oikeat” ohjausarvot on ainoastaan taiteviivojen kohdalla. Aputaiteviivojen ohjausarvot ovat kopioitu oikeista arvoista (keskiviivan tai reunalinjan taiteviivasta). Sivusuunnassa delta-z -arvo voi vaihdella hyvinkin paljon, joten taiteviivan ja ultraäänianturin välisen etäisyyden ollessa liian suuri, syntyy virhettä.

Opastavassa koneohjauksessa sivukaltevuuden ja työstötason ohjausarvot ovat 5 metrin välein. Kyseinen väli on todettu sopivaksi, sillä koneenkuljettajat kerkeävät reagoimaan sekä asettamaan työstösyvyydet ja sivukaltevuuden ohjausarvot suunnitelman mukaisiksi. Lisäksi 5 metrin matkalla pituussuunnassa ei yleensä ole suuria kuhmuja ja kuoppia. Pinnasta ohjaavassa menetelmässä ohjausarvojen väli pituussuunnassa on kuitenkin syytä olla tiheämpi kuin opastavassa koneohjauksessa, sillä automaattinen ohjaus mahdollistaa tarkemman toteutuksen hidastamatta ajonopeutta. Taulukkoon 15 on koottu menetelmän edut ja haasteet.

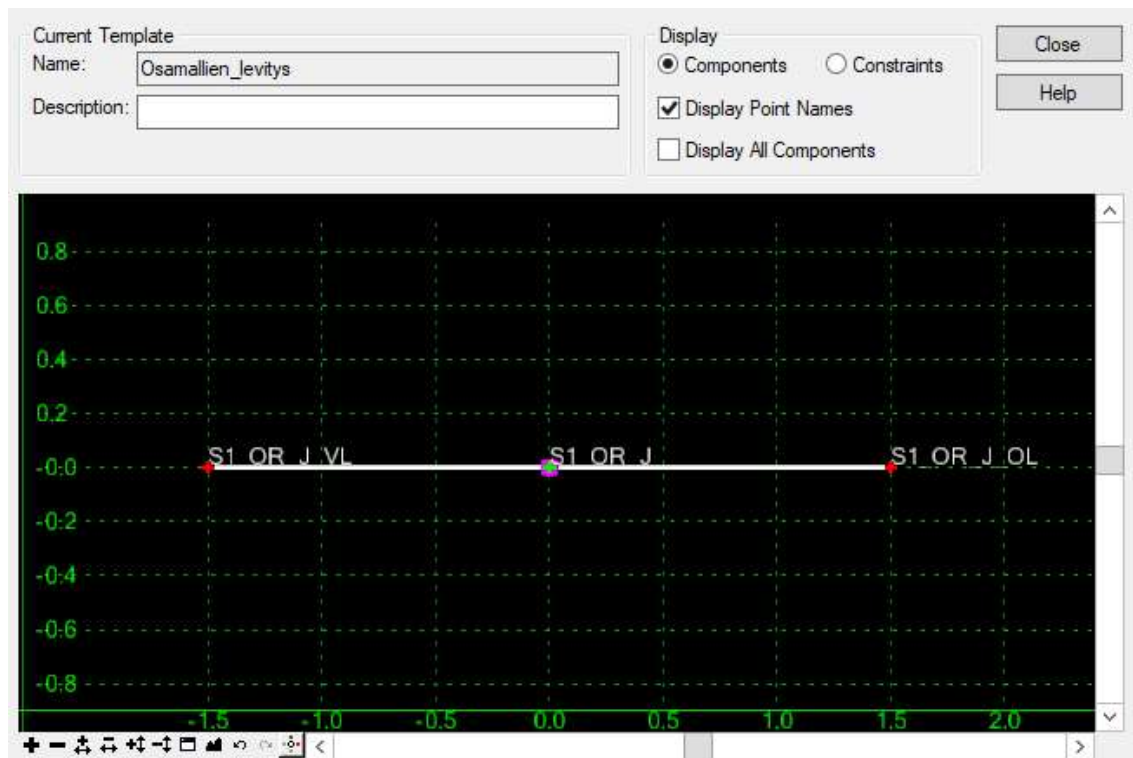
Taulukko 15. Osamalli -menetelmän edut ja haasteet.

Osamalli-menetelmä	
Edut	Haasteet
<ul style="list-style-type: none"> - Ei merkitystä tien sivusuuntaisella paikannusvirheellä <ul style="list-style-type: none"> • Paikannusvirhe ei ole niin vakavaa kuin eromalli-menetelmässä - Korkeutta mittaavia antureita tarvitaan vain toiselle puolelle jyrskintä/levitintä 	<ul style="list-style-type: none"> - Tarvitaan useita tiedostoja <ul style="list-style-type: none"> • Työkoneen ohjauksessa pitää valita oikeat tiedostot. Malli voidaan tehdä kuitenkin niin kapeaksi, että väärä pinta tulee varmasti huomattua. • Oikean sivukaltevuustiedoston käytön voinee pakottaa / valita käyttöön ohjelmallisesti

Suunnittelujärjestelmästä tuotetaan suoraan Excel-muotoinen suunnitelmamalli (kuva 27) ja LandXML/InfraModel 3 (IM3) -muotoiset koneohjausmallit. CAD-suunnitteluohjelmistolla luodaan tyyppipoikkileikkaukset (”templatet”) keski- ja reunaviivoille, joilla ohjelmisto luo automaattisesti levityt taiteviivat suunnitelmamallista (kuva 28).

Paalu	Vasen reunaviiva			Keskilinja			Oikea reunaviiva		
	Northing	Easting	Elevation	Northing	Easting	Elevation	Northing	Easting	Elevation
TO336 140	6881415.189	651577.606	-0.031	6881415.280	651580.983	-0.015	6881415.377	651584.558	-0.033
TO336 145	6881420.186	651577.449	-0.046	6881420.278	651580.848	-0.022	6881420.370	651584.247	-0.045
TO336 150	6881425.224	651577.329	-0.056	6881425.277	651580.729	-0.031	6881425.329	651584.128	-0.040
TO336 155	6881430.224	651577.252	-0.048	6881430.276	651580.652	-0.029	6881430.329	651584.051	-0.041
TO336 160	6881435.214	651577.171	-0.040	6881435.275	651580.571	-0.024	6881435.337	651583.970	-0.038
TO336 165	6881440.213	651577.081	-0.016	6881440.275	651580.481	-0.018	6881440.336	651583.880	-0.042
TO336 170	6881445.213	651576.991	-0.015	6881445.274	651580.391	-0.014	6881445.335	651583.790	-0.045
TO336 175	6881450.212	651576.901	-0.013	6881450.273	651580.301	-0.012	6881450.334	651583.700	-0.054

Kuva 27. Suunnitelmamalli Excel-formaatissa. Kuvassa taiteviivojen pisteet ovat 5 metrin, kun taas koneohjausmallissa niitä tulisi olla tiheämmin (esimerkiksi 0,1 metrin välein).



Kuva 28. Bentley'n Inroads -ohjelmistolla luotu levitetyn osamallin tyyppipoikkileikkaus (template) oikealle reunaviivalle jyrksinnässä. "S1" tarkoittaa suuntaa, "OR" oikeaa reunaviivaa, "J" jyrksintää ja "VL"/"OL" vasenta/oikeaa levitystä.

4 PÄÄTELMÄT

4.1 Saavutetun tarkkuuden riittävyys

Sivukaltevuuden osalta virhetarkastelu osoitti, että toleranssivaatimusten sisällä pysytään erittäin todennäköisesti. Tämä johtuu IMU-laitteiden, lasermittauksen sekä sivukaltevuusanturien korkeasta tarkkuudesta. Lisäksi RTK-GNSS:n paikannus on erittäin tarkka, minkä vuoksi pituussuuntainen sijaintivirhe ei aiheuta merkittävää sivukaltevuuden virhettä, vaikka oltaisiin nopealla sivukaltevuuden muutosalueella (0,5 %-yksikköä / 5 metriä). Teoreettisesti laskettu sivukaltevuuden satunnaisvirhe prosessissa on selkeästi parempi, mitä opastavalla koneohjauksella toteutetuissa kohteissa (0,2-0,3 %-yksikön keskivirhe). Jotta teoreettisen tarkkuuden todenmukaisuutta voisi arvioida paremmin, pitäisi olla saatavilla enemmän tietoa suunnitelma-toteuma -vertailutietoja päällystyskohteiden sivukaltevuuksista.

Virhetarkastelun perusteella pinnasta ohjaavassa menetelmässä myös korkeusaseman +/- 20 mm toleranssi saavutetaan korkealla todennäköisyydellä. GNSS-paikannuksen epätarkkuuden vuoksi koneohjausjärjestelmä voi lukea työstösyvyyden ohjausarvon väärästä sijainnista. Erityisesti sivusuuntainen paikannusvirhe voi aiheuttaa tällöin merkittävää virhettä, jos koneohjausmalli perustuu nykytilamallin ja suunnitelmapinnan välisten korkeuserojen laskentaan kuten Topconin eromalli-menetelmässä. Todellisuudessa korkeusasemalla ei ole juurikaan merkitystä uudelleen päällystystöissä etenkin, kun lähtöaineisto on vain suhteellisesti tarkka.

Sekä korkeusaseman että sivukaltevuuden suhteen merkittävät systemaattiset virheet laskevat suuresti toleranssien saavuttamisen todennäköisyyttä. Esimerkiksi Vt6-kohteessa (kuva 15) sivukaltevuuden keskiarvo suunnitelma-toteuma -vertailussa oli 0,3%-yksikköä. Näin suuret systemaattiset virheet tulisi havaita niin toteutuksessa kuin laadunvarmistuksessakin. PTM-mittauksissa sivukaltevuudelle on kuitenkin sallittu kohtalaisen suuret uusittavuuden tasoerot (systemaattiset poikkeamat) eri PTM-mittaajien välillä (0,15 %-yksikköä). Tasoerot ovat suuret ottaen huomioon sivukaltevuuden toleranssin, joka moottoriteillä on vain 0,3 %-yksikköä.

GNSS-mittauksen tarkkuus ja luotettavuus on parantunut kuluneen vuosikymmenen aikaan merkittävästi, sillä tekniikka on jatkuvasti kehittynyt ja uusia GNSS-järjestelmiä

on otettu käyttöön (Poutanen 2016, s. 5). Amerikkalaisen GPS-järjestelmän rinnalle on tullut eurooppalainen Galileo, venäläinen GLONASS ja kiinalainen BeiDou, joiden myötä satelliittien määrä Maan kiertoradalla on lisääntynyt (Poutanen 2016, s. 5). Järjestelmät eivät ole satelliittipaikannuksen käyttäjälle toisensa pois sulkevia vaihtoehtoja, vaan ne täydentävät toisiaan. Edellytys eri järjestelmien yhtäaikaiselle käytölle on se, että GNSS-vastaanotin pystyy vastaanottamaan eri taajuisia GNSS-signaaleja (monitaajuuslaite) (Poutanen 2016, s. 15-16). Rakentamisessa käytettävät GNSS-vastaanottimet kykenevät yleensä vastaanottamaan neljän suurimman GNSS-järjestelmän taajuuksia yhtäaikaisesti (Topcon 2019a-e; Trimble Inc. 2017 & 2018a-b; Leica Geosystems AG 2015-2017). GNSS-mittaukseen perustuva tasosijainnin (xy/N,E) määrittäminen on riittävän tarkka ja luotettava menetelmä pinnasta ohjaavaan koneohjaukseen. Lyhytaikaisia GNSS-signaalin katkoksia voidaan paikata IMU-laitteella, mikä vahvistaa koneohjausjärjestelmän kykyä säilyttää toimintakyky. GNSS-paikannusta voi heikentää tieväylien olosuhteissa ainakin korkea puusto ja kallioleikkaukset (monitieheijastukset), joten kyseiset ympäristötekijät tulisi huomioida, kun valitaan päällystyskohteessa käytettävää koneohjausmenetelmää. Siltojen alla ja tunneleissa GNSS-paikannus on heikko, mutta kyseisissä kohteissa tulisi muutenkin käyttää absoluuttista 3D-koneohjausta.

Työssä ei erikseen arvioitu sitä, mikä olisi riittävä paikannustarkkuus toteumatiedon mittaamisessa, mutta Ollin (2017, s. 12) mukaan toteumamallin muodostaminen edellyttäisi vähintään 0,5 metrin tarkkuutta. Tämä saavutetaan ”helposti” RTK-GNSS -paikannuksella (keskivirhe 0,01-0,03 metriä).

Työn aikana pohdittiin myös mahdollisuutta hyödyntää koneohjausjärjestelmän paikannuksessa differentiaalista GNSS-mittausta, mutta sillä saavutettavat kustannussäästöt ovat pienet suhteutettuna merkittävään paikannustarkkuuden heikentymiseen. Lisäksi pystysuunnan ja sivukaltevuuden virheet ovat niin suuria, että tasosijainnin tulisi olla mahdollisimman tarkka. RTK-GNSS on vakiinnuttanut asemansa koneohjausjärjestelmien paikannusmenetelmänä takymetrimittauksen kanssa, sillä se on todettu riittävän tarkaksi, luotettavaksi ja kustannustehokkaaksi menetelmäksi (Mulari 13.12.2018, sähköpostikeskustelu). Valmistajilla ei siten todennäköisesti olisi kiinnostusta vaihtoehtoisten paikannusmenetelmien kehittämiseen (Mulari 21.9.2018, keskustelu).

Ultraääniantureita on pitkään hyödynnetty koneohjaussovelluksissa (esimerkiksi päällystystyökoneiden 2D-järjestelmissä), joten tekniikan voi olettaa luotettavaksi työmaan olosuhteissa. Ultraäänianturin toimintaperiaatetta kehitettävässä menetelmässä ei kuitenkaan tarkasti määritelty (saatiikka kokeiltu) tässä työssä, joten sen soveltuvuutta automaattiseen koneohjaukseen tien pinnasta on hankala täsmällisesti arvioida. Työssä ehdotetut havaintojen keskiarvoistus ja suurimpien poikkeamien suodattaminen parantaisi ultraäänimittauksen tarkkuutta ja luotettavuutta. Reaaliaikainen suunnitelma-toteuma -vertailu päällystystyössä lisäisi toteutuksen tarkkuutta, kun esimerkiksi systemaattiset virheet olisivat helpommin havaittavissa.

Virheiden kokonaisvaltainen hallinta on edellytys laadukkaalle lopputulokselle tietomallipohjaisessa päällystystyössä, jonka eri vaiheissa on lukuisia virhelähteitä. Virheitä ei voi ikinä täysin poistaa, mutta niiden suuruutta ja sitä kautta vaikutusta lopputuloksessa voidaan hallita, kun ne ovat tunnettuja ja toimijoiden tiedossa. Virheiden hallinnan keinoja ovat muun muassa:

- valinnat käytettävästä tekniikasta, esimerkiksi
 - käytetäänkö halvempaa, mutta heikomman tarkkuuden omaavaa antennia vai tarkempaa ja kalliimpaa
 - käytetäänkö yhtä vai kahta GNSS-antennia
- työtekniset seikat, esimerkiksi
 - kuinka suuret etäisyydet sallitaan takymetrin ja prisman välillä tai RTK-vastaanottimen ja -tukiaseman välillä
 - laadunvarmistus työn aikana
- mittalaitteiden ja työkoneiden huolto, kontrollimittaukset sekä kalibroinnit

Listauksesta huomaa, että virheiden paremmasta hallinnasta seuraa usein kustannusten kasvua. Tietomallipohjaisessa päällystystyössä, kuten kaikissa muissakin mittauksissa tai mittauksia sisältävissä prosesseissa, täytyykin arvioida tarkkuuden ja luotettavuuden lisäksi taloudellisuutta. Mittauksen taloudellisuusvaatimuksen mukaan tarkemmasta mittauksesta saavutettava hyöty täytyy olla riittävä suhteessa vaadittuihin kustannuksiin (Heikkilä 1994).

4.2 Ohjausmenetelmän taloudellisuus

Pinnasta ohjaavan koneohjauksen taloudellisia hyötyjä arvioitiin vertaamalla prosessin vaiheita vaihtoehtoisten menetelmien vastaaviin vaiheisiin. Tuloksien pohjalta voidaan luotettavasti, joskin suurpiirteisesti, osoittaa, että automaattisella koneohjauksella suhteessa tien pintaan voidaan saavuttaa huomattavia hyötyjä lähtötietovaiheen osalta, kun menetelmää verrataan automaattiseen 3D-koneohjaukseen. Myös toteutusvaiheessa menetelmä on edullisempi, sillä takymetriohtaukseen perustuva 3D-koneohjausjärjestelmä vaatii mittamiehen operoimaan takymetreja. Lisäksi jysynnässä takymetriohtaus rajoittaa työkoneneen ajonopeutta, minkä vuoksi kohteeseen käytetty aika on suurempi kuin pinnasta ohjaavassa menetelmässä. Suhteelliseen ohjaukseen perustuvan järjestelmän komponentit ovat selkeästi halvempia kuin takymetreihin perustuvan järjestelmän. Opastavaan koneohjaukseen verrattuna menetelmä on investointikustannusten (erillisen koneohjausjärjestelmän vuoksi) osalta kalliimpi, mutta toisaalta jysynnässä kehitettävällä menetelmällä voidaan mahdollisesti saavuttaa nopeampi ajo- ja työnopeus, mikä vähentää kohteen suoritusaikaa ja sitä kautta työtunteja.

Materiaalisäästöjen osalta menetelmällä voidaan saavuttaa samoja etuja kuin nykyisillä koneohjauksen menetelmillä: esimerkkilaskelmat osoittivat koneohjauksen tuovan selkeitä kustannussäästöjä verrattuna perinteiseen menetelmään tasausmassan käytön vähenemisen myötä. Opastavassa koneohjauksessa on heikoin ohjaustarkkuus ja siksi myös suurimmat erot toteutuneiden ja suunniteltujen massamäärien välillä. Ilman kokeiluja on vaikea sanoa, kuinka suuri ero ohjaustarkkuudessa ja sitä kautta suunniteltujen ja toteutuneiden massamääriä on, kun automaattista 3D-takymetriohtausta verrataan automaattiseen suhteelliseen ohjaukseen.

Työn tulosten perusteella automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan on taloudellisuuden näkökulmasta hyvinkin kannattava menetelmä. On kuitenkin huomattava, että luotettavampia taloudellisuustarkasteluja kehitettävästä menetelmästä voi tehdä vasta pilottikokeilujen jälkeen. Kokeiluista saadaan toteutuneita kustannustietoja muun muassa komponenteista, toteutuksen tarkkuudesta (materiaalisäästöt) ja työnopeudesta. Muihin menetelmiin (perinteinen, 3D-koneohjaus, opastava koneohjaus) vertailukelpoisia tuloksia saadaan vasta sitten, kun pinnasta ohjaavan koneohjauksen tekniikkaa ja työtapoja on saatu jalostettua ensimmäisistä

testikohteista kerättyjen kokemusten pohjalta. Vertailu on mielekkäämpää, kun menetelmät ovat kehityksen osalta samalla tasolla.

Perinteiseen päällysteenkorjaukseen (LTA + TAS) verrattuna koneohjausmenetelmillä parannetaan huomattavasti enemmän tien turvallisuutta ja ajomukavuutta sekä saavutetaan säästöjä elinkaarikustannuksissa. Näitä on kuitenkin erittäin vaikea muuntaa rahalliseksi arvoksi, minkä vuoksi työssä taloudellisuuden tarkastelu rajattiin toteutuskustannuksiin. Kapeasta tarkastelusta huolimatta koneohjausmenetelmät osoittautuivat perinteistä menetelmää kustannustehokkaammaksi riittävän suurilla kohteilla.

4.3 Koneohjausmallin tuottamisen arviointi

Kuten jo todettu menetelmän ohjaustarkkuuden ja taloudellisuutta käsittelevissä kappaleissa, menetelmään parhaiten soveltuva koneohjausmallin tyyppi voidaan selvittää ainoastaan pilottihankkeissa. Teoreettisen tarkastelun pohjalta voidaan kuitenkin luotettavasti todeta, että työssä kehitetyssä osamalliratkaisussa on parempi sietokyky virhepaikannusta kohtaan kuin Topconin käyttämässä eromalliratkaisussa sivuttaissuuntaisen virhepaikannuksen vaikutuksen eliminoitumisen vuoksi. Sivusuuntainen virhe aiheuttaa selvästi herkemmin korkeusasema-toleranssin ylityksen kuin pituussuuntainen virhe. Tämä johtuu siitä, että nykypinnasta johdettujen suunnitteluratkaisujen työstösyvyyden ohjausarvot (Δz) vaihtelevat enemmän tien poikkisuunnassa kuin pituussuunnassa; pituussuuntaiset puutteet tiessä (painumat tai heitot) ovat suhteellisen pitkiä, poikkisuunnassa urat ja painumat taas johtavat merkittäviin vaihteluihin työstösyvyyksissä lyhyelläkin matkalla.

Osamallien tekeminen lisää hieman töitä suunnitteluvaiheeseen ja nostaa työskentelyvirheen riskiä työmaalla (vahingossa käytettäisiin väärää osamallia), mutta riski on hallittavissa ohjeistuksella ja siten pieni suhteessa saavutettuihin etuihin. Mallien tuottamisen työmäärä on pieni, kun suunnittelujärjestelmään on tehty automaattiset toiminnot koneohjausmallin tuottamiseen (esimerkiksi tyyppipoikkileikkaukset ja suunnitelmasta tulostettavat excel- ja xml-tiedostot).

Kehitetty ratkaisu, jossa koneohjausjärjestelmä lukee työstötason (Δz) ja sivukaltevuuden eri malleista, ei ole tietävästi kokeiltu tai mahdollista nykyisillä

järjestelmillä. Koneohjausjärjestelmien päivittäminen tai kehittäminen tukemaan tällaista ominaisuutta tuskin on kuitenkaan vaikeaa.

4.4 Jatkotutkimus- ja kehitysehdotukset

Työn tulosten perusteella pinnasta ohjaavaa ohjausmenetelmää on syytä kokeilla. Tällä hetkellä menetelmän vaatimaa koneohjausjärjestelmää ei ole saatavilla, mutta mikäli tilaaja edellyttäisi menetelmän pilotointia, niin urakoitsija voisi pyytää koneohjausjärjestelmien valmistajaa kehittämään komponentteja tai vaihtoehtoisesti kokeilla olemassa olevia, samankaltaisia suhteellisen ohjauksen järjestelmiä (Topcon: Smoothride, Tyker: Road profiler).

Työssä kehitetyn menetelmän pilotointi kannattaa suorittaa vaiheittain. Ensimmäisenä olisi syytä kokeilla automaattista toteumatiedon muodostamista menetelmän mukaisilla ultraääniantureilla ilman koneohjausta. Käytännön kokemusten perusteella voitaisiin kehittää suhteellisen mittauksen tekniikkaa menetelmään sopivaksi ja määrittää esimerkiksi liukuvaan keskiarvoon käytettävä matka. Tämän jälkeen menetelmän mukaista koneohjausta voitaisiin kokeilla jyrskoneessa, sillä jyrskinnän koneohjaus on selkeämpää (helpompaa) kuin levityksen. Viimeisimpänä menetelmää kokeiltaisiin tasausmassan levityksessä. Vaiheittain etenevällä pilotoinnilla menetelmän käyttöönotto ja oppiminen tapahtuisi hallitusti. Piloteista saatujen kokemusten jälkeen voitaisiin laatia buildingSmart YIV-ohjeistuksen mukainen menetelmäkuvaus toimintatavasta.

Tilaajalle ja suunnittelijalle tulisi kehittää työkalu, jolla voisi hankekohtaisesti arvioida koneohjauksessa saavutettavia etuja suhteessa siihen kuluneisiin kustannuksiin ja siten auttaa päälliskohteiden toteutustavan valinnassa. Arvioinnissa tulisi huomioida turvallisuuden ja ajomukavuuden paranemisesta saatavat hyödyt, mitkä ovat tosin erittäin hankala muuntaa rahalliseksi arvoksi. Myös koneohjausmenettelyllä saatavat säästöt elinkaarikustannuksissa tulisi huomioida kattavan käsityksen muodostamiseksi.

Toteutuksen aikana urakoitsijalla olisi hyvä olla tieto siitä, kuinka suuret ovat jyrskinnän tai tasauksen massamäärät esimerkiksi seuraavan 100 metrin päästä. Kun massamäärät ovat ennakkoon tarkasti tiedossa, voidaan kuljetusautojen operointi optimoida. Nykyisin urakoitsijan käytäntönä on hieman ylivoimistaa kuljetusautojen määrää, jotta asfalttiryhmän työ ei keskeytyisi autojen puutteen vuoksi. Pitkät odotusajat aiheuttavat

ylimääräisiä kustannuksia ja tasausmassan jäähtymistä. Urakoitsija voisi suunnitella kuljetusautojen logistiikkaa, mikäli suunnittelija toimittaisi massamäärät kohteen eri osuuksilla. Tasausmassan määrät kohteella vaikuttavat luonnollisesti myös asfalttiaseman ja jyrien operointiin.

Jatkossa tulisi tutkia infrahankkeille tarkoitettujen yhteiskäyttöalustojen (esim. InfraKit, Topcon Sitelink3D, Trimble Connect) tarjoamia mahdollisuuksia tietomallipohjaisessa päällystystyössä. Alustojen kautta voitaisiin siirtää suunnitelma-aineistot ja koneohjausmallit urakoitsijalle. Urakoitsija taas voisi välittää toteumatiedon tilaajalle ja suunnittelijalle. Toteutuksen aikana yhteiskäyttöalustan kautta voisi reaaliaikaisesti seurata esimerkiksi kuljetusautojen sijainteja sekä tiivistämisen toteutumista.

Työn virhetarkastelu-osassa tarkasteltiin tietomallipohjaisen päällystystyön satunnaisvirheiden lähteitä. Virheiden suuruuksien arvioinnissa jouduttiin monesti nojautumaan valmistajien ilmoittamiin mittaustarkkuuksiin (usein optimaalisissa oloissa määritetyt) sekä asiantuntijoiden valistuneisiin arvioihin. Jotta saataisiin luotettavampaa tietoa prosessin virhelähteistä (erityisesti toteutusvaiheen), olisi syytä toteuttaa tutkimus päällystystyössä käytettävien koneiden ja mittalaitteiden satunnaisvirheistä. Tutkimuksessa tulisi havainnoida muun muassa GNSS-paikannusvirheen, anturien kohinan ja jyrsinpiikkien kulumisen vaikutuksia päällystystyön lopputulokseen. Tutkimustuloksista voitaisiin arvioida, minkä toiminnon epävarmuutta kontrolloimalla (pienentämällä) saavutetaan suurin hyöty suhteessa kustannuksiin. Vain virheiden lähteet ja syntymekanismit tuntemalla, niitä voidaan hallita.

Suhteellisessa ohjauksessa hyödynnettävää liukuvan keskiarvon pituutta voisi jatkossa optimoida kohdekohtaisesti sen sijaan, että käytettäisiin aina samaa arvoa. Optimoinnissa tulisi huomioida ainakin seuraavat seikat:

- nykyisten ajoneuvojen (henkilöautot, raskas liikenne) ominaistajuudet
 - pyörän ja akseliston ominaistajuus
 - korin ominaistajuus
- kohteen nopeusrajoitukset
- suhteellisesti tarkan lähtöaineiston tuoma rajoitus tasausten pituuksiin

Mobiililaserkeilaus on voimakkaasti kehittyvä tekniikka, jonka hyödyntämistä verkkotasoisessa mittauksessa tulisi harkita. Tätä on ehdotettu muun muassa vuonna 2014 Maintenance BIM 2012-2013 -tulosraportissa (Marttinen & Heikkilä 2014, s. 53).

Verkkotasoinen mittaus edellyttäisi automatisoitua 3D-pistepilven analysointia, jota onkin kehitetty esimerkiksi reunapalteiden korkeusmittauksen ja maalimerkintöjen digitoinnin osalta (Roadscanners Oy, 2017; Prochazka et al. 2018). Mobiililaserkeilausta voidaan hyödyntää päällysteen kunnon arvioimisen lisäksi muun muassa seuraavissa analyyseissa (Glennie et al. 2013, s. 50-54):

- näkemäanalyysit
- puuston raivaustarpeet (ilmajohtojen tai näkemän vuoksi)
- kuivatusanalyysit (esim. pientareiden kaltevuudet, ojien kunto)
- dataa autonomisille ajoneuvoille
- infran inventointi (esim. liikennemerkkit)

Käyttöönottoa rajoittavana tekijänä on kustannukset, mutta verkkotasolla datan keräyksessä ei välttämättä tarvitse hyödyntää tehokkaimpia laserkeilaimia. Mikäli verkkotasoinen mittauksen tarkkuus on riittävä, niin sen pohjalta voitaisiin määrittää korjauskohteita, jotka edelleen hanketasolla mitattaisiin tehokkaammilla mobiililaserkeilaimilla korjaussuunnittelua varten.

Suomessa kehitystä verkkotasoinen mittaukseen suuntaan onkin tapahtunut: Väyläviraston, Lapin ja Keski-Suomen ELY-keskusten sekä Roadscanners Oy:n Pehko-projektissa pilotoidaan uusimpia diagnostiikkateknologioita päällysteiden ennakoivan kunnossapidon kehittämiseksi (ELY-keskus 2015). Projektissa käytetään mitta-autoa, jonka komponentteihin kuuluu muun muassa laserkeilain (Roadscanners Oy 2018). Väylävirastolla on myös pilottihanke Posti Oyj:n ja Vaisala Oy:n kanssa, jossa postiautoissa olevien kameroiden ja konenäön avulla analysoidaan muun muassa päällysteen kuntoa ja inventoidaan infrarakenteita (Posti Group Oyj 2018).

LÄHDELUETTELO

3D Laser Mapping, 2018. *StreetMapperIV* [verkkodokumentti]. Nottingham, UK: 3D Laser Mapping. Saatavilla: <https://libguides.bournemouth.ac.uk/bu-referencing-harvard-style/webpage> [Luettu 10.9.2018]

Alanaatu, P., Eskola, T., Virtala, P., 2016. *Tien epätasaisuustunnusluvun kehittäminen - RIDE-ajoneuvomalli* [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavilla: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2016-46_tien_epatasaisuustunnusluvun_web.pdf [Luettu 25.2.2019]

Asfalttikallio, 2017. *Geometrian korjaus koneohjauksella Vt 7* [verkkodokumentti]. Digitalisaatiohankkeen tuloseseminaari, Helsinki 10.10.2017. Saatavilla: https://www.liikennevirasto.fi/-/digitalisaatio-tienpaallystystoissa-liikenneviraston-kokeilujen-satoa#.XBn_91wzaUm [Luettu 18.12.2018]

Cronvall, T., Kråknäs, P. & Turkka, T., 2012. *Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa* [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41 - 2012. Saatavilla: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/121138/lts_2012-41_978-952-255-193-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Luettu 28.12.2018]

Dietrich, J., 2009. *PTM-vertailukokeet ja mittaustulosten käsittely* [verkkodokumentti]. Esitelmä: PANK-menetelmäpäivä, Helsinki 22.1.2009. Saatavilla: http://pank.fi/file/318/jaakko_dietrich.pdf [Luettu 1.10.2018]

Dietrich, J., Junes, J. & Nevalainen, N., 2017. Liikenneväylien korjausvelka 2017 [verkkodokumentti]. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 44/2017. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2017-44_liikennevaylien_korjausvelka_web.pdf [Luettu 1.9.2018]

Encyclopedia of Mathematics, 2018. *Three-sigma rule* [verkkosivu]. Saatavilla: https://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Three-sigma_rule [Luettu 1.12.2018]

Eskola, K., 2017. *Digitalisaatio tienpäällystystöissä - Liikenneviraston kokeilujen satoa* [verkkosivu]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavilla: <https://www.liikennevirasto.fi/>

/digitalisaatio-tienpaallystystoissa-liikenneviraston-kokeilujen-satoa#.XBn801wzaUk
[Luettu 18.12.2018]

Glennie, C., Hurwitz, D., Knodler, M., Olsen, M. J., Persi, F., Reedy, M., Roe, G. V., Squellati, A., Tuss, H. & Williams, K., 2013. *Guidelines for the Use of Mobile LIDAR in Transportation Applications*. Washington, D.C.: National Cooperative Highway Research Program - Transportation Research Board. NCHRP Report 748. Saatavilla http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_748.pdf [Luettu 1.11.2018]

Heikkilä, R., 1994. *Mittaukset – Tekniikan tärkein tiedonsaantikeino*. Oulu: Oulun yliopisto.

Heikkilä, R., Marttinen, M., 2014. *MAINTENANCE BIM TULOSRAPORTTI 2011 – 2012* [verkkodokumentti]. Vantaa: InfraFINBIM. Saatavilla: <https://buildingsmart.fi/pilotti/maintenance-bim-2012/> [Luettu 1.7.2018]

Heikkilä, R., Marttinen, M., 2015. *MAINTENANCE BIM TULOSRAPORTTI 2013 – 2014* [verkkodokumentti]. Vantaa: InfraFINBIM. Saatavilla: <https://buildingsmart.fi/pilotti/maintenance-bim-2013-2014/> [Luettu 1.7.2018]

Hokkanen, V., 2012. *METHODS FOR AUTOMATED CIVIL CONSTRUCTION PRODUCTION CONTROL* [verkkodokumentti]. Insinööriyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53163/Hokkanen_Visa.pdf?sequence=1 [Luettu 2.1.2019]

Hänninen, P., 1991. *Maatutkaluotaus maaperägeologisissa tutkimuksissa* [verkkodokumentti]. Helsinki: Geologian tutkimuslaitos. Tutkimusraportti 103. Saatavilla: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_103.pdf [10.10.2018]

Jaakkola, M., 2013. *Vt 13 pilotti: mallipohjaisen päällysteenkorjauksen suunnittelu ja toteutus*. Esitelmä: IFB Pilottipäivä 24.10.2013. Saatavilla: http://www.rts.fi/infrabim/infrabim_uusi/pilottipaiva8/Vt13%20rakenteen%20parantaminen_Mika%20Jaakkola.pdf [Luettu: 23.11.2018]

Karjalainen, J., 2018. *Muuttuva kunnossapito ja rahoitus*. Liikennevirasto. Esitelmä: Asfalttialan palautepäivät.

Kilpeläinen, P., Nevala, K., Tukeva, P., Rannanjärvi, L., Näyhä, T. & Parkkila, T., 2004. *Älykäs tietyömaa* [verkkodokumentti]. VTT: Espoo. VTT TIEDOTTEITA 2255. Saatavilla: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2255.pdf> [Luettu 3.1.2019]

Kohn, S.D., Tayabji, S., Perera, R.W., 2005. *Achieving a High Level of Smoothness in Concrete Pavements Without Sacrificing Long-Term Performance* [verkkodokumentti]. Georgetown Pike, McLean, VA.: Federal Highway Administration. Saatavilla: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/05068/05068.pdf> [Luettu 25.1.2019]

Korkiala-Tanttu, L. & Onninen, H., 2001. *TIENRAKENNEKERROSTUTKIMUKSET* [verkkodokumentti]. Espoo: Tiehallinto. TPPT 13. Saatavilla: <https://docplayer.fi/179427-Menetelmakuvaus-tppt-13.html> [Luettu 10.11.2018]

Kukko, A., 2013. *Mobile Laser Scanning – System development, performance and applications* [verkkodokumentti]. Opinnäytetyö: Väitöskirja. Kirkkonummi: Geodeettinen laitos. Saatavilla: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/12100?locale-attribute=fi> [Luettu 1.10.2018]

Laurila, P., 2012. *MITTAUS- JA KARTOITUSTEKNIKAN PERUSTEET* [verkkodokumentti]. 4. painos. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulu. Saatavilla: <http://www.ramk.fi/loader.aspx?id=7fe99c68-3849-4fa8-a563-9327cf51ea79> [25.9.2018]

Leica Geosystems AG, 2013. *Leica PaveSmart 3D User Manual* [verkkodokumentti]. Heerbrugg: Leica Geosystems AG. Saatavilla: <https://kb.sccsurvey.co.uk/download/146/paving-systems/2233/leica-pavesmart-3d-user-manual.pdf> [Luettu 10.1.2019]

Leica Geosystems AG, 2015a. *Leica Nova MS60* [verkkodokumentti]. Heerbrugg: Leica Geosystems AG. Saatavilla: https://leica-geosystems.com/-/media/Files/LeicaGeosystems/Products/Datasheets/Leica_Nova_MS60_DS.ashx?la=en&hash=AB5679E327538292C23BD76C0CCF3B52 [Luettu 10.1.2019]

Leica Geosystems AG, 2015b. *Leica Viva TS16* [verkkodokumentti]. Heerbrugg: Leica Geosystems AG. Saatavilla: https://leica-geosystems.com/-/media/Files/LeicaGeosystems/Products/Datasheets/Leica_Viva_TS16_DS.ashx?la=en&hash=2746A736346652C1C8CF15B5371AD534 [Luettu 10.1.2019]

Leica Geosystems AG, 2015c. *Leica Viva GS15 - Data sheet* [verkkodokumentti]. Heerbrugg: Leica Geosystems AG. Saatavilla: <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-viva-gs15> [Luettu 10.1.2019]

Leica Geosystems AG, 2016. *Leica Viva GS16 - Data sheet* [verkkodokumentti]. Heerbrugg: Leica Geosystems AG. Saatavilla: <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-viva-gs16> [Luettu 10.1.2019]

Leica Geosystems AG, 2017. *Leica GS18 T - Data sheet* [verkkodokumentti]. Heerbrugg: Leica Geosystems AG. Saatavilla: <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/smart-antennas/leica-gs18-t> [Luettu 10.1.2019]

Leinonen, J., Jaakkola, M., Onninen, H., 2015. *Ajoneuvolaserkeilaus tien painuman mittauksessa – Pilottiraportti* [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavilla: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lts_2015-08_ajoneuvolaserkeilaus_tien_web.pdf [Luettu 25.10.2018]

Leirimaa, O., 2015. *Monikeilaus- ja mobiililaserkeilausaineistojen yhdistäminen vesirakenteiden mittauksessa* [verkkodokumentti]. Opinnäytetyö: Insinöörityö. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/99934/Leirimaa_Olli.pdf [Luettu 7.8.2018]

Liikennevirasto, 2016. *Kestävämpää liikennettä ja väylänpitoa - Katse kasvihuonepäästöjen vähentämisessä*. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lr_2016_kestavampaa_liikennetta_web.pdf [Luettu 20.8.2018]

Liikennevirasto, 2017. *Perusväylänpito ja liikenneväylien korjausvelkaohjelma 2016–2018 - Väliraportti 6/2017* [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lr_2017_perusvaylanpito_korjausvelkaohjelma_web.pdf [Luettu 5.8.2018]

Marttinen, M., 2016. *Koneohjaus päällystysalalla*. Esitelmä. Päällystekurssit 15.-16.3.2016. NCC Roads Oy: Helsinki.

Marttinen, M., 2018. *Yleiset inframallivaatimukset YIV2018 - Osa 11.2: ASFALTIPÄÄLLYSTEIDEN GEOMETRIAPUUTTEIDEN TIETOMALLIPOHJAINEN KORJAUSHANKE* [verkkodokumentti]. Helsinki: buildingSMART FINLAND.

Marttinen, M., Pienimäki, M., 2015. *Yleiset inframallivaatimukset YIV2015 Osa 11.1: INFRAMALLINNUS PÄÄLLYSTEIDEN KORJAAMISESSA* [verkkodokumentti]. Helsinki: buildingSMART FINLAND. Saatavilla: https://buildingsmart.fi/wp-content/uploads/2015/11/YIV2015-Mallinnusohjeet_OSA11_1_Inframallinnus_paeallysteiden_korjaamisessa_V_1_0.pdf [Luettu 4.6.2018]

MOBA Mobile Automation AG, 2006. *Sonic-Ski* [verkkodokumentti]. Limburg: MOBA Mobile Automation AG. Saatavilla: https://moba-platform.com/media/pdf/bc/a3/94/04-20-10010_Ultrasonic_Grade_Sensor_Sonic-Ski_PWM_spec.pdf [Luettu 16.1.2019]

MOBA Mobile Automation AG, 2009. *Sonic-Ski plus (CAN/PWM)* [verkkodokumentti]. Limburg: MOBA Mobile Automation AG. Saatavilla: https://moba-platform.com/media/pdf/a7/7b/a3/04-21-10130_Sonic-Ski_Plus_SKIS-1500_PWM_CAN_spec.pdf [Luettu 16.1.2019]

MOBA Mobile Automation AG, 2013. *Big Sonic-Ski* [verkkosivu]. ForConstructionPros.com. Saatavilla: <https://www.forconstructionpros.com/construction-technology/product/10850740/moba-corporation-big-sonicski> [Luettu 15.1.2019]

Mäki, V., 2016. *TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER -TEKNIIKAN KÄYTTÖ TIERAKENTEIDEN DIAGNOSTIIKASSA* [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavilla:

<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/24814/M%C3%A4ki.pdf?sequence=3&isAllowed=y> [Luettu 1.12.2018]

NCC Suomi Oy, 2018. *Jyrsinnät ja stabiloinnit* [verkkosivu]. Helsinki: NCC Suomi Oy. Saatavilla: <https://www.ncc.fi/tarjontamme/asfaltti/palvelut-ja-menetelmat/jyrsinnat-ja-stabiloinnit/> [Luettu 13.12.2018]

Niskanen, J., 2015. *Yleiset inframallivaatimukset YIV2015 - Osa 1 TIETOMALLIPOHJAINEN HANKE* [verkkodokumentti]. buildingSMART Finland. Saatavilla: <https://buildingsmart.fi/infrabim/yiv/> [luettu 14.12.2018]

Oksanen, J., 2019. *Korkeusmallit* [verkkosivu]. Helsinki: Maanmittauslaitos. Saatavilla: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/korkeusmallit> [Luettu 15.10.2018]

Olli, M., 2017. *JYRSINNÄN 3D-KONEOHJAUS: AUTOMAATTISEN TOTEUMAMALLIN LUONTI*. DIGIPILOTTIRAPORTTI. Helsinki: NCC Industry Oy & Liikennevirasto. Saatavilla: https://vayla.fi/documents/20473/431718/3D_toteumamalli_Digipilottiraportti.pdf/33fc9d4b-a481-4d4d-9c60-6b02570790d1 [Luettu 25.1.2019]

Ollikainen, M., 2018. *FINNREF-TUKIASEMAVERKKO/PAIKANNUSPALVELU JA SEN KEHITTÄMINEN* [Powerpoint] [verkkodokumentti]. Helsinki: Maanmittauslaitos. Saatavilla: http://www.maankaytto.fi/arkisto/mmp/2018/ollikainen_marko.pdf [Luettu 18.1.2019]

PANK ry, 2017. *Asfalttinormit 2017*. Helsinki: PÄÄLLYSTEALAN NEUVOTTELUKUNTA, PANK ry. ISBN 978-952-99985-3-1

PANK ry, 2018a. *Asfalttialan oppimateriaali (ASKO) – Levitys*. Helsinki: PÄÄLLYSTEALAN NEUVOTTELUKUNTA, PANK ry. Saatavilla: <http://pank.fi/tekniset-vaatimukset/muut-julkaisut/opinnaytteet-ja-muut-selvitykset/asfalttialan-oppimateriaali-asko> [Luettu 10.8.2018]

PANK ry, 2018b. *Asfalttialan oppimateriaali (ASKO) – Tiivistys*. Helsinki: PÄÄLLYSTEALAN NEUVOTTELUKUNTA, PANK ry. Saatavilla:

<http://pank.fi/tekniset-vaatimukset/muut-julkaisut/opinnaytteet-ja-muut-selvitykset/asfalttialan-oppimateriaali-asko> [Luettu 10.8.2018]

PANK ry, 2018c. *Asfalttialan oppimateriaali (ASKO) – Esi- ja jälkityöt*. Helsinki: PÄÄLLYSTEALAN NEUVOTTELUKUNTA, PANK ry. Saatavilla: <http://www.pank.fi/file/1120/c6-esi--ja-j-lkit-it-.pdf> [Luettu 10.8.2018]

Pekkala, J., 2015. *3D-LASERKEILAUSSAINEISTON HYÖDYNTÄMINEN INFRAMALLINTAMISEN YHTEYDESSÄ JA SEN LOPPUTUOTTEEN LAADUN VARMENTAMINEN* [verkkodokumentti]. Diplomityö. tampereen Teknillinen yliopisto. Saatavilla: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23368/Pekkala.pdf?sequence=3> [Luettu: 28.12.2018]

Posti Group Oyj, 2018. *Posti and Vaisala process data to improve road conditions and traffic safety using artificial intelligence* [verkkosivu]. Helsinki: Posti Group Oyj. Saatavilla: https://www.posti.fi/business-news/english/current/2018/20180627_posti_vaisala.html [Luettu 15.2.2019]

Prochazka, D., Prochazkova, J., Landa, J., 2017. Automatic lane marking extraction from point cloud into polygon map layer. *European Journal of Remote Sensing* [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/22797254.2018.1535837?needAccess=true> [Luettu 15.2.2019]

Rajala, J., 2016. *Mobiililaserkeilausaineiston hyödyntäminen päällystyskohteen nykytilan analysoimisessa* [verkkodokumentti]. Insinööritö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavilla <http://www.theseus.fi/handle/10024/120802> [Luettu 13.12.2018.]

Repo, H., 2006. Betonitiet jäivät Suomessa kokeiluksi. *Tekniikka & Talous* [verkkosivu]. 17 Elokuu 2006. Helsinki: Tekniikka ja Talous. Saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/rakennus/2006-08-17/Betonitiet-j%C3%A4iv%C3%A4t-Suomessa-kokeiluksi-3252630.html> [Luettu 22.10.2018]

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017. *RIEGL VZ-2000i* [verkkodokumentti]. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. Saatavilla:

http://www.geocenter.fi/NGC/wp-content/uploads/2017/12/RIEGL_VZ-2000i_Datasheet_2017-12-06_Preliminary.pdf [Luettu 14.12.2018]

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2019. *RIEGL VMX-2HA* [verkkodokumentti]. Itävalta: RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. Saatavilla: <http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/produktdetail/product/scanner/56/> [Luettu 14.12.2018]

Ristikartano, J., Iikkanen, P., Tervonen, J. & Lapp, T., 2014. *Valtakunnallinen tieliikenne-ennuste 2030* [verkkodokumentti]. Helsinki: Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 13/2014. Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2014-13_valtakunnallinen_tieliikenne-ennuste_web.pdf [Luettu 1.9.2018]

Roadscanners Oy, 2017. *Kokeilun raportti: Tiealueen monitorointi* [verkkodokumentti]. Rovaniemi: Roadscanners Oy. Saatavilla: <https://vayla.fi/documents/20473/367242/Tiealueen+monitorointi+-kokeilun+raportti.pdf/97bfdca5-d9e9-4cf1-a994-0b5e87d6d94e> [Luettu 15.2.2019]

Roadscanners Oy, 2018. *Roadscanners PEHKO project video* [video, verkkosivu]. Rovaniemi: Roadscanners Oy. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=aR6nRplRH3o> [Katsottu 15.2.2019]

Sarjanen, T., 2016. *Menetelmäkuvaukset VR Track Oy:n mittauspalveluille* [verkkodokumentti]. Insinööritoimisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavilla: <http://www.theseus.fi/handle/10024/108903> [Luettu 13.12.2018.]

Taylor, J., 1997. *An introduction to Error Analysis. 2nd edition*. Sausalito: University Science Books, 1997. 327 s. ISBN 0-935702-42-3.

Teledyne Optech Inc. 2018. Lynx HS300 Mobile Survey System™ [verkkodokumentti]. Toronto: Teledyne Optech. Saatavilla: <http://www.teledyneoptech.com/en/products/mobile-survey/lynx-hs300/> [Luettu 14.12.2018]

Tiehallinto, 2004. *Rakenteen parantamissuunnittelua edeltävät maatutkatutkimukset ja tulosten esitystapa – menetelmäkuvaus* [verkkodokumentti]. Helsinki: Tiehallinto. Saatavilla: <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf/2100027-v-04rakentparantamissuunn.pdf> [Luettu 27.10.2018]

Tiehallinto, 2005. *Verkkotason taipumamittausten tarveselvitys* [verkkodokumentti]. Helsinki: Tiehallinto. Saatavilla: <https://docplayer.fi/24548236-Verkkotason-taipumamittausten-tarveselvitys.html> [Luettu 18.1.2019]

Tiehallinto, 2006. *Käsikirja päällysteiden pinnan kunnon mittaamiseen* [verkkodokumentti]. Helsinki: Tiehallinto. Saatavilla: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf/3201047-v-kasikirja_paallysteiden_pinnan_kunnon_mitt.pdf [Luettu 25.2.2019]

Topcon Positioning Systems Inc., 2018a. *SmoothRide Control: Component and Machine Inspection* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. <https://www.topconpositioning.com/support/article/smoothride-control-component-and-machine-inspection>

Topcon Positioning Systems Inc., 2018b. *SmoothRide Control: System Setup* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <https://www.topconpositioning.com/support/article/smoothride-control-system-setup> [luettu 1.10.2018]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019a. *HiPer HR* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <https://www.topconpositioning.com/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-hr> [luettu 18.1.2019]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019b. *HiPer SR* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <https://www.topconpositioning.com/gnss/integrated-gnss-receivers/hiper-sr> [luettu 18.1.2019]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019c. *HiPer V* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla:

<https://www.topconpositioning.com/gnss/integrated-gnss-receivers/hiper-v> [luettu 18.1.2019]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019d. *HiPer V* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <https://www.topconpositioning.com/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-vr> [luettu 18.1.2019]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019e. *GR-5* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <https://www.topconpositioning.com/gnss/integrated-gnss-receivers/gr-5> [luettu 18.1.2019]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019f. *2D Milling Control - Best average - Sonic averaging system* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <https://www.topconpositioning.com/paving/milling/2d-milling-control> [luettu 18.1.2019]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019g. *SmoothRide Control: System Installation - Paver* [verkkodokumentti]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <https://www.topconpositioning.com/support/article/smoothride-control-system-installation-paver> [luettu 18.1.2019]

Topcon Positioning Systems, Inc., 2019h. *mmGPS* [verkkosivu]. Livermore, CA: Topcon Positioning Systems, Inc. Saatavilla: <http://www.topconcare.com/en/hardware/mc-sensors/mmgps/> [luettu 18.1.2019]

Touring Machine Company, 2007. *Pitch, Roll, and Yaw* [verkkosivu]. Saatavilla: <https://www.touringmachine.com/Articles/aircraft/6/> [Luettu 10.12.2019]

Trafikverket, 2017. *Comparison of Vectorisation and Road Surface Analysis from Helicopterborne System and Mobile Mapping*. Borlänge: Trafikverket. Publikationsnummer: 2018:073 Saatavilla: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/45075/Ineko.Product.RelatedFiles/2018_073_Comparison_of_Road_Surface_Analysis_and_Vectorisation_from_Helicopterborne_System_and_Mobile_Mapping.pdf [1.2.2019]

Trimble Inc. 2013a. *Trimble MX8 - Datasheet* [verkkodokumentti]. Trimble Inc. Saatavilla: https://www.trimble.com/imaging/pdf/Trimble_MX8_Datasheet.pdf [Luettu 14.12.2018]

Trimble Inc. 2013c. *Trimble Paving Control Systems PCS900 3D for Milling Machines* [verkkodokumentti]. Trimble Inc. Saatavilla: <https://construction.trimble.com/sites/default/files/literature-files/2016-07/PCS900-Milling-Machines-Machine-System-Spec-Sheets-EN.pdf> [Luettu 14.12.2018]

Trimble Inc., 2013b. *Trimble MX2 - Datasheet* [verkkodokumentti]. Trimble Inc. Saatavilla: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-mx2> [Luettu 14.12.2018]

Trimble Inc., 2017. *Datasheet - Trimble R8s*. Trimble Inc.: Sunnyvale, California. Saatavilla: <https://drive.google.com/file/d/0BxW3dqQ5gdnTNzRDTFJZbmx3OVU/view> [Luettu 10.1.2019]

Trimble Inc., 2018a. *Trimble MX9 - Datasheet* [verkkodokumentti]. Trimble Inc. Saatavilla: https://geotronics.es/files/products/231/Trimble%20MX9%20Mobile%20Imaging%20System_DS_GSE.pdf [Luettu 14.12.2018]

Trimble Inc., 2018b. *Datasheet - Trimble R10*. Trimble Inc.: Sunnyvale, California. Saatavilla: https://drive.google.com/file/d/1MTvjdv_v4SVzNhhVGz8mp36sW6BFQhw8/view [Luettu 10.1.2019]

Trimble Inc., 2018c. *Datasheet - Trimble R8s*. Trimble Inc.: Sunnyvale, California. Saatavilla: <https://drive.google.com/file/d/0BxW3dqQ5gdnTc3VtcExMMk5jV1k/view> [Luettu 10.1.2019]

Trimble Inc., 2019a. *Austin Materials Focuses on Paving Accuracy and Improved Safety with Trimble PCS900 Paving Control System* [verkkosivu]. Trimble Inc.: Sunnyvale, California. <https://construction.trimble.com/customer-stories/austin-materials-focuses-paving-accuracy-and-improved-safety-trimble-pcs900-paving> [Luettu 10.1.2019]

Trimble Inc., 2019b. *3D Milling: a South African runway success story* [verkkosivu]. Trimble Inc.: Sunnyvale, California. Saatavilla: <https://construction.trimble.com/customer-stories/3d-milling-south-african-runway-success-story> [Luettu 10.1.2019]

Trimble Inc., 2019c. *Trimble Helps Contractor Save Time and Money on Kunming Airport Project* [verkkosivu]. Trimble Inc.: Sunnyvale, California. Saatavilla: <https://construction.trimble.com/customer-stories/trimble-helps-contractor-save-time-and-money-kunming-airport-project> [Luettu 10.1.2019]

Tyker Construction BV, 2018a. *Road Profiler* [video, verkkosivu]. WH Wageningen, Hollanti: Tyker Construction BV. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=x7o4R97buqw> [Katsottu 10.1.2019]

Tyker Construction BV, 2018b. *Road Profiler* [verkkosivu]. WH Wageningen, Hollanti: Tyker Construction BV. Saatavilla: <http://www.tyker.com/roadprofiler/> [10.1.2019]

van Diggelen, F., 2007. *Update: GNSS Accuracy: Lies, Damn Lies, and Statistics* [verkkosivu]. Cleveland, Ohio: North Coast Media LLC. Saatavilla: <https://www.gpsworld.com/gpsgnss-accuracy-lies-damn-lies-and-statistics-1134/> [Luettu 23.8.2018]

Vasama, T., 2017. *Geometrian korjaus koneohjauksella - Tilaajan kommentti* [verkkodokumentti]. Digitalisaatiohankkeen tulosseminaari, Helsinki 10.10.2017. Saatavilla: https://www.liikennevirasto.fi/-/digitalisaatio-tienpaallystystoissa-liikenneviraston-kokeilujen-satoa#.XBn_91wzaUm [Luettu 18.12.2018]

Vermeer, M., 2018. *Geodesia* [verkkodokumentti]. Helsinki: Aalto-yliopisto. Saatavilla: <https://users.aalto.fi/~mvermeer/> [Luettu 1.11.2018]

Virtala, P., 2017. *Tien kunnan mittaaminen* [verkkodokumentti]. Destia. Saatavilla: <https://docplayer.fi/47873998-Tien-kunnan-mittaaminen-pertti-virtala.html> [Luettu 10.12.2018]

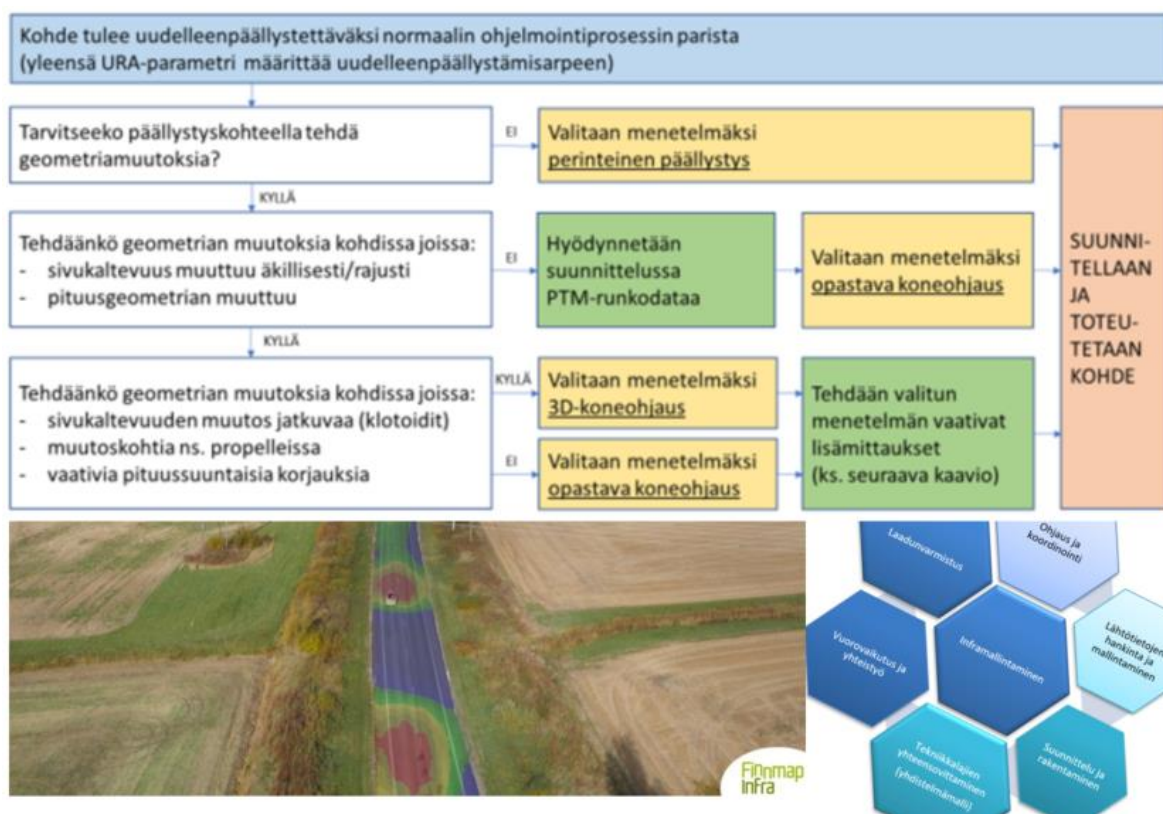
Wirtgen GmbH, 2016. *Animation Cold Milling Machine: Vacuum Cutting System* [video, verkkosivu]. Windhagen, Saksa: WIRTGEN GmbH. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=5a1c9Q0aWZI> [katsottu 1.9.2018]

Vögele, 2018. *VÖGELE Big MultiPlex Ski* [verkkodokumentti]. Ludwigshafen: JOSEPH VÖGELE AG. Saatavilla: https://www.voegel.info/en/technologies/grade-slope-control/voegele_big_multiplex_ski.html [Luettu 15.1.2019]

YIV 11.2

Osa 11.2

ASFALTTIPÄÄLLYSTEIDEN GEOMETRIAPUUTTEIDEN TIETOMALLIPOHJAINEN KORJAUSHANKE



Dokumentin versiohistoria

Versio	Päiväys	Tekijä	Kuvaus
1.0	30.10.2018	Manu Marttinen	Ohje koekäyttöön
1.1	31.12.2018	Mikko Ailisto	Lisätty ohjeistusta uuteen koneohjausmenetelmään

SISÄLLYS

Korjaukseen liittyviä termejä.....	4
1 JOHDANTO.....	6
1.1 Ohjeesta	6
1.2 Tietomallinnus infra-alalla.....	7
2 SUUNNITTELUN OHJAUS.....	8
3 LÄHTÖTIETOJEN HANKINTA JA TULKINTA	10
3.1 Yleistä	10
3.2 Automaattinen 3D-koneohjaus.....	12
3.3 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan	15
3.4 Opastava koneohjaus.....	15
4 Suunnittelu	17
4.1 Automaattinen 3D-koneohjaus.....	17
4.2 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan	19
4.3 Opastava koneohjaus.....	19
5 Päälystekorjauksen lähtötiedot	20
5.1 Yleistä	20
5.2 Automaattinen 3D koneohjaus	20
5.3 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan	20
5.4 Opastava koneohjaus.....	21
6 Päälystekorjauksen toteutus	22
7 Määrien todentaminen ja Tilaajalle luovutettava aineisto	24
7.1 Määrien todentaminen	24
7.2 Tilaajalle luovutettava aineisto	24
8 Laadunhallinta ja laatuvaatimukset.....	25
8.1 Yleistä	25
8.2 Automaattinen 3D koneohjaus	25
8.3 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan	25
8.4 Opastava koneohjaus.....	25

Korjaukseen liittyviä termejä

Kunnossapito	<p>Infra-alalla kunnossapito-termi ei ole yksiselitteinen. Liikenneviraston tienpidon määrittelyjen mukaan maanteiden kunnossapitoon kuuluu päällystettyjen teiden, sorateiden, siltojen, tieympäristön sekä laitteiden ja rakenteiden hoito ja ylläpito. (Kunnossapito = hoito + ylläpito)</p> <p>http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/kunnossapito/teiden_kunnossapito</p> <p>Kadunpidon terminologian mukaan kunnossapito on rakenteen tai laitteen kunnon palauttamista alkuperäistä vastaavaksi ja sillä pidennetään teknistä käyttöä (Ylläpito = kunnossapito + hoito (+käyttö))</p>
Ylläpito	<p>Tieverkolla ylläpito on kunnossapidon osa, johon sisällytetään rakenteeseen vaikuttavia toimia. Yleisimpiä näistä ovat asfaltointi, rakenteenparannustyöt (esimerkiksi rummunvaihto, kiilan rakennus, massanvaihto, teräsverkon asennus) ja tiemerkintöjen ylläpito.</p> <p>Kadunpidon tehtävaluettelon mukaan ylläpitoon sisältyy rakenteiden ja laitteiden kunnossapito, hoito ja käyttöön liittyvät tehtävät.</p> <p>Tämän lisäksi muiden infratoimijoiden kunnossa-/ylläpidon terminologia saat- taa poiketa ylläesitetystä. Esimerkiksi vesihuoltoverkoston ylläpitoon lasketaan kuuluvaksi saneeraus, kunnossapito ja käyttö.</p>
Hoito	<p>Sekä tien- että kadunpidossa hoidolla varmistetaan teiden tai katujen päivittäisen liikennöitävyys. Yleisimpiä hoidon toimia ovat talvihoito (esimerkiksi aeraus, suolaus), kesähoito (esimerkiksi sorateiden pölynesto), kuivatuksesta huolehtiminen (esimerkiksi ojan perkuu ja kaivu), liikenneympäristön hoito ja pienet asfalttipaikkaustyöt.</p>
Infran hallinta	<p>Vuoden 2015 aikana on esitetty, että infranimikkeistö tulee muuttumaan siten, että Liikennevirasto ja Kuntaliitto ottavat käyttöön yhteiset termit. Vanhoista termeistä kunnossapito ja ylläpito jäävät kokonaan pois. Uusi toimenpidetermi ”infran hallinta” tulee koostumaan käsitteistä ”korjaus”, ”hoito” ja ”käyttö”. ”Korjaus”-termi tulee käsittämään periaatteessa edellä mainitun (poistuvan) Liikenneviraston käyttämän ”ylläpito”-termin asiat. ”Hoito”-termi taas kattaa samat asiat kuin Liikenneviraston ”hoito”-käsite kattoi aikaisemminkin. ”Käyttö”-termi on lähinnä laitteiden hallintaa ja käyttöä, kuten ulkovalaistuksen sytyttämistä ja sammuttamista (eli Hallinta = korjaus + hoito + käyttö).</p>

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

Tässä ohjeessa pyritään käyttämään tätä uutta 2015 ehdotettua infran hallintaan perustuvaa terminologiaa.

Päällysteen korjaaminen	Päällysteiden korjauksella tarkoitetaan tien päällystekerrokseen syntyneiden vaurioiden (halkeamat, purkaumat, reiät, epätasaisuudet tai roudan aiheuttamat vauriot) korjausta. Korjaaminen voi olla pelkästään erilaisin menetelmin toteutettua uudelleenpäällystämistä, mutta siihen voi liittyä myös jysintää ja tasausmassan käyttöä.
Toteutusmalli	Tietomalli, joka on yleensä osa kohteen suunnitelmaa ja jonka avulla voidaan ohjata työsuoritetta ja sen eri vaiheita työmaalla.
Koneohjausmalli	Toteutusmallin muoto, jossa ohjataan automaattisesti itse työkonetta ilman, että koneenkuljettajan tarvitsee puuttua työkoneen sähköhydrauliseen ohjausjärjestelmän tekemän työstön (esimerkiksi höylässä terän, asfaltinjysimessä rummun, asfaltinlevittäjässä perän) ohjaamiseen. Koneohjausmallia käytettäessä koneenkuljettaja yleensä kuitenkin ohjaa työkoneen liikkumista työmaalla. Voidaan toteuttaa absoluuttisessa 3D-koordinaatistossa tai suhteessa tien pintaan*.
Opastava koneohjaus	Toteutusmallin muoto, jolloin suunnittelumalli tuodaan työkohteelle ”manuaalisesti” esim. tabletin avulla tai merkitsemällä suunnitelmätiedot suoraan tien pintaan. Työnsuorittaja (esim. kuljettaja) ohjaa manuaalisesti työtä (konetta) kyseisen ohjeistuksen mukaisesti.
Toteumamalli	Rakentamisen tai korjaustoimien jälkeen toteutuneesta työstä tehtyjen mittaus-ten perusteella laadittu malli. Mittaus voidaan tehdä erillisenä toimenä toteutuksen jälkeen tai itse työtä tekevällä koneella. Toteumamallin ero toteutusmalliin kuvastaa tehdyn työn toteutuksen epätarkkuutta. Toteumamallin eroa toteutusmalliin voidaan käyttää rakentamisen laadun määrittämiseen (onko rakennettu toleranssiin?) ja laadun osoittamiseen.
Levitetty osamalli	Erillään toimitettava koneohjausmalli taiteviivalle (keski- ja reunaviivat), joka on levitetty sivusuuntaisen paikannusvirheen vaikutuksen pienentämiseksi.
Sivukaltevuusmalli	Erillään toimitettava koneohjausmalli sivukaltevuuksille.

* Automaattisesta 3D-koneohjauksesta on kertynyt runsaasti kokemuksia päällysteen korjauksessa ja menetelmä on vakiintunut. Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan on uusi menetelmä, jota on tarkasteltu vasta teoreettisella tasolla. Menetelmää koskevat ohjeet perustuvat sen vuoksi oletuksiin ja niitä tullaan tarkentamaan piloteista saatujen kokemusten jälkeen.

1 JOHDANTO

1.1 Ohjeesta

Tässä ohjeessa esitellään mallintamisen hyödyntämistä infran hallinnassa.

YIV 2015 ohjeessa 11.1. INFRAMALLINNUS PÄÄLLYSTEIDEN KORJAAMISESSA on esitelty yleisesti tietomallintamisen käyttömahdollisuuksia ja kokemuksia erilaisissa infran hallinnan tehtävissä, ja annettu yleisiä ohjeita päällysteiden korjaamisesta mallipohjaista suunnittelua hyödyntäen.

Tämä YIV 2018 ohje 11.2. ASFALTTIPÄÄLLYSTEIDEN GEOMETRIAPUUTTEIDEN TIETOMALLIPOHJAINEN KORJAUSHANKE on jatkoa YIV 2015 ohjeelle 11.1. INFRAMALLINNUS PÄÄLLYSTEIDEN KORJAAMISESSA.

Tässä YIV 2018 ohjeessa 11.2. ASFALTTIPÄÄLLYSTEIDEN GEOMETRIAPUUTTEIDEN TIETOMALLIPOHJAINEN KORJAUSHANKE käydään yksityiskohtaisemmin läpi geometriapuutteiden korjausprosessi. Ohjeen on tarkoitus antaa etenkin tilaajille lisätietoa: millaisien geometriapuutteiden korjaamiseen mallipohjainen prosessi sopii parhaiten.

1.2 Tietomallinnus infra-alalla

Tietomallintaminen on viime vuosina yleistynyt infra-alalla erityisesti uudisrakentamisessa. Korjausrakentamisen puolella mallintamista on käytetty huomattavasti vähemmän. Tietomallintamista voidaan soveltaa korjausrakentamisen tarpeisiin monin tavoin – aivan samoin kuin rakentamisvaiheessa. Rakentamisen luonteisissa toiminnoissa – kuten esim. päällystämässä – mallinnus on sisällöltäänkin hyvin samanlaista ”suunnittelua”, mutta yleisimmin infran hallinnan toiminnoissa tietomallinnus olisi enemmänkin systemaattista tiedonhallintaa ja sen hyödyntämistä.

Mallintamiseen yleisesti liitetty käsite kohteen elinkaaren aikaisesta tiedon hyödyntämisestä konkretisoituu infran hallintaan liittyvissä toiminnoissa. Suunnittelu- ja rakennusvaiheessa koottu tieto tulisi pystyä liittämään hallinnan aikana kerättyyn tietoon, laatia näiden kesken synteesejä ja analysoida tietoa päätöksen tueksi. Yksinkertaisimmillaan nykyisinkin runsaasti saatavilla olevan tiedon (mittaus- tai rekisteritietojen) hyödyntämistä voitaisiin parantaa liittämällä laatutietoon globaali paikkatieto.

Korjaamisessa tietomallintamisella tavoitellaan samoja hyötyjä kuin uudisrakentamisessakin. Infra-alalla on jo käytännössä osoitettu, että tuotemallintamisen avulla

- rakentamisen tuottavuus paranee
- virheet vähenevät
- suunnittelun ja rakentamisen laatu paranee
- kustannukset hallitaan paremmin
- saadaan luotettavampaa määrätietoa
- hankkeessa toimijoiden kommunikointi ja yhteistyö paranee
- suunnitteluratkaisuja voidaan esitellä havainnollisesti
- prosessin eri toimintoihin saadaan enemmän läpinäkyvyyttä.

Erityisesti korjaamisessa mallintamalla on mahdollista

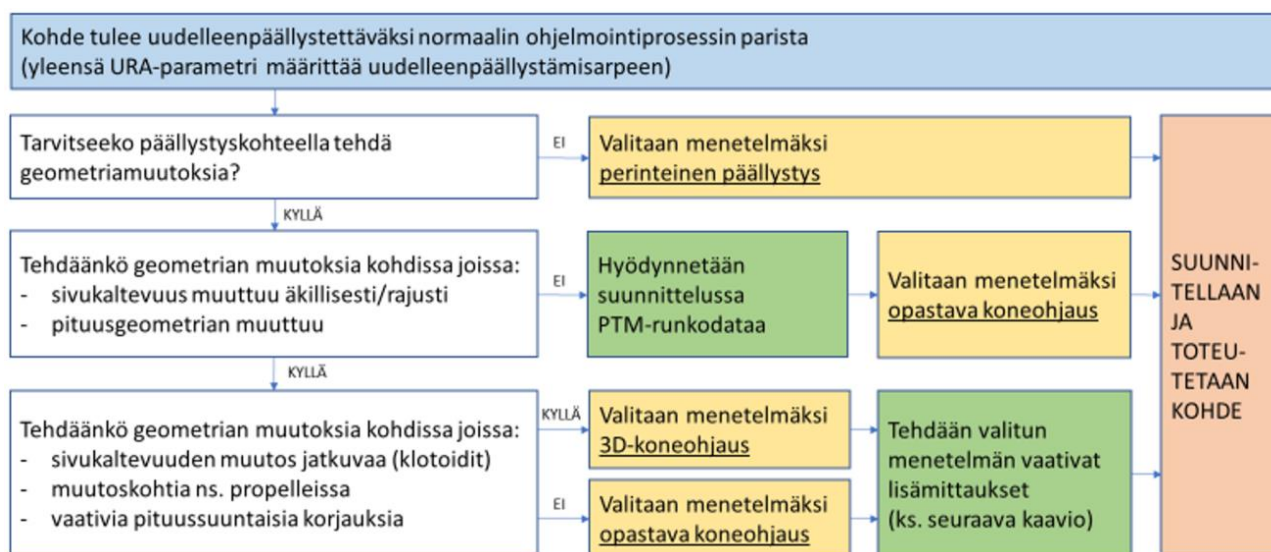
- siirtää kohteeseen liittyvät tiedot keskitetysti vaiheesta toiseen (aina rakentamisesta lähtien)
- hyödyntää lähtötietoja nopeasti ja havainnollisesti
- visualisoida suunnitteluratkaisut suhteessa lähtötilanteeseen
- optimoida korjaukseen käytettäviä varoja kohdentamalla toimenpiteet ongelmakohtiin
- lisätä korjaustöiden turvallisuutta
- kehittää hankintamenettelyjä.

2 SUUNNITTELUN OHJAUS

Suunnittelun ohjauksen perusajatuksena on, että tieverkolta etsitään ne osuudet, joilla on geometriapuutteita. Visiona on, että nämä geometriapuutoskohdat voitaisiin esittää koko verkon laajuudelta esimerkiksi Tieräkisterissä tunnuslukuina tai Tiestötietojärjestelmässä objekteina. Perusdatana geometriapuutoskohtien löytämiseen toimisi esimerkiksi ohjelmointia varten tehty Palvelutasomittaus ja siitä lasketut tunnusluvut tai mobiilikartoitus.

Löydetyille ongelmakohdille tehdään tarkempi tasaussuunnitelma. Tällöin esimerkiksi yhdelle 10 km yhteysvälille saattaa tulla useita muutaman sadan metrin korjauskohteita joiden keskinäinen etäisyys vaihtelee. Tilaajan tehtävä on yhdessä suunnittelijan kanssa etsiä nämä kohteet.

Yhteysvälin normaalin päällystyskierron yhteydessä, geometriapuutosten korjaukset toteutettaisiin samalla. Alla olevassa prosessikaaviossa (kuva 1) on kuvattuna päällystekorjauksen menetelmävalinta päällysteiden geometriapuuteisen korjauksesta. Prosessikaavion on tarkoitus selkeyttää valittavien toteutus-, suunnittelu- ja lähtötietojenhankintamenetelmiä suhteessa tiestöllä ilmeneviin geometriapuutteisiin.



kuva 1. päällystekorjauksen menetelmävalinta päällysteiden geometriapuuteisen korjauksesta

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

Tämä ohje ei tule esittämään numeraalisia raja-arvoja menetelmän valitsemisen tueksi. Sen sijaan ohjeessa annetaan esimerkkejä kohteista, joilla mallipohjainen päällystekorjaus ja automaattinen 3D-koneohjaus ovat tuoneet lisäarvoa.

Esimerkkikohteet julkaistaan myöhemmin tämän ohjeen liitteinä.

Koska päällystämisen menetelmin (asfaltinlevitys, jysrintä) tehtävä geometriakorjaus on yksikköhin-
taurakointia, ja mallipohjainen päällystekorjaus sisältää vielä paljon uusien tekniikoiden ja työtapojen im-
plementointia päällystysalalle, lähtökohta on, että tilaaja (Liikennevirasto, ELY-keskus) esittää käytettävän
menetelmän ja tekniikan, joilla sekä päällystystyö, että suunnittelu ja lähtötietojen hankinta tulee toteut-
taa:

- opastava koneohjaus PTM-runkodatan avulla
- automaattinen 3D koneohjaus erillismittausta avulla
- opastava koneohjaus erillismittausten avulla

Tilaaja vastaa kohteen lähtötietojen mittauttamisesta ja suunnitelman teettämisestä. On suositeltavaa, että
valitulla suunnittelijalla on jatkuva keskusteluyhteys mittauksen suorittajaan ja valittuun urakoitsijaan. On
lisäksi suositeltavaa, että valittu suunnittelija toimii valvojan roolissa työn toteutuksen aikana.

Suositus: valittu suunnittelija hoitaa suunnittelun lähtötietojen hankinnan ja urakan toteutuksen laadunval-
vonnan. Tilaaja sopii suunnittelijan avustuksella lähtötietomittauksia tekevien tahojen kanssa mitattujen
lähtötietojen jalostamisesta suunnittelun lähtötiedoksi. Tämä menettely on kuvattu tarkemmin kappa-
leessa 3.1 Yleistä.

3 LÄHTÖTIE TOJEN HANKINTA JA TULKINTA

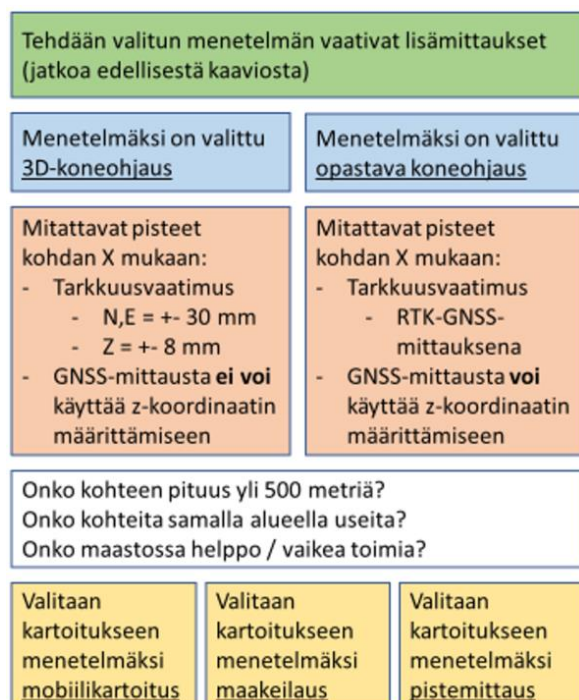
3.1 Yleistä

Lähtötiedot on mitattava globaalissa absoluuttisessa koordinaatistossa.

Suositus: ennen mittausten aloitusta on kohteelle sovittava fyysiset paalut, joihin kaikki mittaukset kiinnitetään. Kyseinen menettely on kuvattu ohjeen ”Yleiset inframallivaatimukset YIV2015 Osa 11.1 Inframallinnus päällysteiden korjaamisessa” kohdassa: ”Hankekohtainen koordinaatisto ja eri lähtötietojen yhteensovitus”.

Suunnittelun lähtötietojen hankintavaiheessa päällystekorjauksessa käytettävä menetelmä on oltava tiedossa. Tämän jälkeen pintamalliin liittyvät lähtötiedot voidaan mitata alla olevan prosessikaavion (kuva 2) mukaisin menetelmin. On kuitenkin mahdollista myös mitata mobiilikartoituksen avulla pistepilvidataa varastoon ja suorittaa muut mittaukset vasta kun päällystekorjausmenetelmä on valittu. Tällöin on kuitenkin syytä huomioida tierakenteeseen mahdollisesti tulleet muutokset aikavälillä mobiilikartoitus-päällystäminen.

Mobiilikartoitus on suositeltavaa valita menetelmäksi, jos kohteen pituus on riittävä ja/tai samalla alueella on useampia kohteita. Vastaavasti lyhyillä kohteilla voi maakeilaus tai pelkkä takymetrimittaus tulla kyseen halvemman hintansa puolesta. Menetelmän valintaa voi tukea kustannuslaskelman avulla.



kuva 2. pintamallin lähtötiedot, mittaustavan valinta

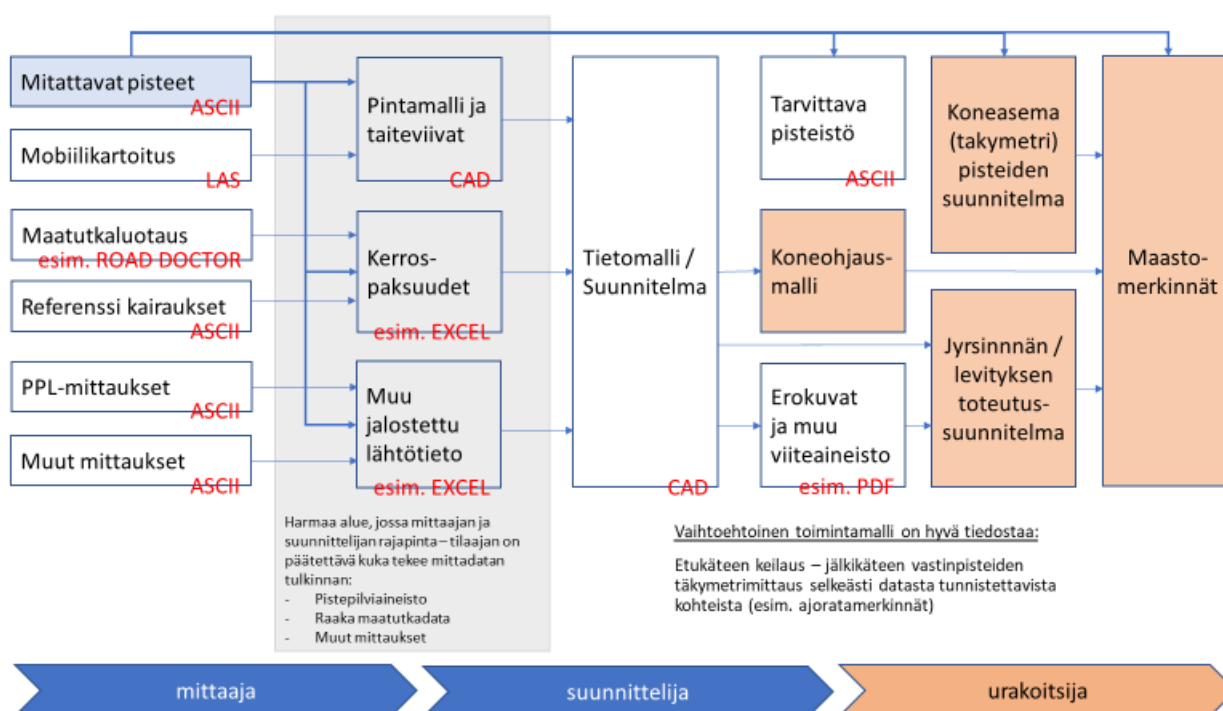
YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

Mitattujen lähtötietojen jalostuminen toteutussuunnitelmaksi (toteutusmalliksi ja/tai koneohjausmalliksi) on kuvattu alla olevassa prosessikaaviossa (kuva 3). Kyseisessä prosessikaaviossa on myös hahmoteltu eri toimijoille tyypillisiä vastuualueita.

Tilaajan on selvästi määrittävä vastuualueiden rajat.

Suositus: tilaaja voi käyttää tarvittaessa ulkopuolista konsultointi apua etenkin eri lähtötietodatan tulkintoihin liittyvissä kysymyksissä. Esimerkiksi pelkkää mobiilikartoituksen avulla saatua pistepilvitiedostoa ei selaisenaan voi käyttää suunnittelun lähtötietona, vaan data on ensin asetettava oikeaan koordinaatistoon, jonka jälkeen sen avulla on luotava muun muassa pintamalli ja taiteviivat.



kuva 3. mitattujen lähtötietojen jalostuminen toteutussuunnitelmaksi

3.2 Automaattinen 3D-koneohjaus

Yleistä

Päällystekorjauksen toteutusta varten kiintopisteverkon tulee olla riittävän tiheä. Tiheys riippuu tien geometriasta ja pisteiden näkyvyydestä. Päällystyskohteella, mistä tahansa tarkastelupisteestä, tulee olla esteetön näkyvyys vähintään kolmeen kiintopisteeseen, jotka sijaitsevat maksimissaan 150 metrin päässä kyseiseltä tarkastelupisteeltä.

Lähtötietojen mittauksen osalta, kohteella toteutetaan valitussa menetelmässä ainakin:

- kiintopisteiden mittaus
- pintamallin lähtötietojen mittaus: esimerkiksi mobiilikartoitus
- rakennemallin lähtötietojen mittaus: esimerkiksi maastokaluotaus

Kohteella on järkevää toteuttaa mobiilikartoitus, jos kohteen pituus tai koko on ”riittävä”. Esimerkiksi 100 metrin pituista kohdetta alemmalla tieverkolla ei ole järkevää mitata mobiilikartoituksella, vaan mittaukset voidaan suorittaa vain maastomittauksin.

Kiintopistelistaus ja tarvittaessa lisäkiintopisteiden mittaus

- hankitaan tiedot olemassa olevista kiintopisteistä (MML, kunnat, rakennushankeen luovutusaineisto, suunnitelma- ja toteumatietovarasto)
- mitataan tarvittaessa lisäkiintopisteitä, jos olemassa olevien pisteiden määrä ei ole riittävä

Mobiilikartoitus

- käytettävän laitteen tulee olla kalibroitu mobiililaserkeilausjärjestelmä, joka koostuu laserskanne-rista tai -skannereista, inertialaitteesta sekä paikannuslaitteesta
- laitteesta tulee olla kalibroitodistus, josta selviää eri komponenttien sisäiset tarkkuudet / tehdasarvot (maksimi +- 1 cm)
 - o mittausoperaattorin on varmistettava laitteiston kalibroinnin ajantasaisuus ja kaluston mitaustarkkuus ennen hanketta tai vähintään vuosittain suoritettavalla kenttäkalibroinnilla
- keilaus tulee suorittaa sellaisella pistetiheydellä, että suunnittelijalle voidaan toimittaa luotettava noin 5 cm pistevälillä oleva harvennettu maanpinnan pisteistö
- ajorata tulee jälkilaskea, ja paikannuksen jälkilaskennan tulee perustua fyysiseen tai virtuaaliseen tukiasemadataan
- eri ajolinjojen väliset aineistot tulee sovittaa toisiinsa ja georeferoida.
- pisteistöstä luokitellaan vähintään asfalttipinnan tai kovien pintojen pisteet
- pisteillä tulee olla paikkatiedon lisäksi vähintään intensiteettiarvot sekä ajolinja- ja keilaintiedot
- luovutettava aineisto vähintään:
 - o raakapisteistö
 - o harvennettu pistepilvi (pistetiheys minimi 400 / m2)
 - o ajolinjatiedot
 - o sovituksen laaturaportointi
 - o mittausraportti

Laadunvarmistus

- Pistepilven laadunvarmistus tehdään mittauksen suorittavan konsultin toimesta takymetrillä mitaamalla pituus- ja poikkiprofiilit tilaajan määrittämiltä satunnaisilta tarkistusalueilta, minimissään 3 tarkistusaluetta / kohde ja vähintään 1 / km. Laadunvarmistusmittausten tulokset toimitetaan tilaajalle aineiston toimittamisen yhteydessä. Pituusprofiilit mitataan reuna- ja keskiviivan keskeltä minimissään 5 metrin matkalta pistetiheyden ollessa maksimissaan 20 cm. Poikkiprofiilit (minimin 2 kpl / tarkistusalue) mitataan koko ajoradan leveydeltä pistetiheyden ollessa maksimissaan 20 cm. Mittauksessa suositellaan käytettäväksi prismatonta mittausta turvallisuussyistä. Keskivirhe mobiilikeilauksen ja tarkistusmittauksen välillä saa olla maksimissaan N,E = +- 30 mm Z = +- 8 mm.
- Kevennetyssä versiossa mobiililaserkeilauksen laadunvarmistuksen voi tehdä keilausaineistojen sovitukseen käyttämättömien signaalipisteiden avulla erot raportoiden.

Maakeilaus tai pintamallin teettäminen vain maastomittauksin

- Jos pinnan kartoitus tehdään (pienillä kohteilla) maakeilaimella tai takymetrillä, suunnittelija määrittää tarvittavat pistevälit ja tarkkuudet

”Mitattavat pisteet”

- runkopisteet (peruspisteet)
 - o suositellaan käytettäväksi Liikenneviraston ohjetta
 - o E4 luokan peruspisteet, minimietäisyys 500 metriä, maksimietäisyys 5 000 metriä / ajorata
 - o olemassa olevia runkopisteitä tihennetään tarvittaessa
 - o tarkkuusvaatimus N,E = +- 30 mm Z = +- 8 mm
- signaalointipisteet; mobiililaserkeilausdatan sovitukseen
 - o E5-E6 luokan pisteitä sovitettuna peruspisteistöön
 - o tarkkuusvaatimus N,E = +- 30 mm Z = +- 8 mm
 - o tekniikkavaatimus takymetri tai tarkkavaaitus (GNSS tai muuta vastaavaa mittausta ei saa käyttää z-koordinaatin määrittämiseen)
 - o ohjearvo signaalointipisteiden väliseksi maksimietäisyydeksi 100 metriä / ajorata (200 metriä / kaista)
 - o tasokoordinaatit voidaan mitata myös RTK-GNSS -mittauksena (esim. Trimnet tai HxGN SmartNet)
- käyttöpisteet, tien ulkopuolelle perustettavat pisteet
 - o E5-E6 luokan pisteitä sovitettuna peruspisteistöön
 - o pisteet sijoitetaan tiealueen välittömään läheisyyteen
 - o pisteet rakennetaan Liikenneviraston Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot (18/2017) mitausohjeiston kohdan 2.3.2 mukaisesti
 - o perättäisillä pisteillä tulee olla esteetön näkyvyys ja maksimietäisyys saa olla 200 metriä

Korkeuden määrittäminen suoritetaan Liikenneviraston korkeusmittausohjeen mukaisesti (kohta 2.3.4).

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

Kevennetyssä versiossa, kun kohteena on yksittäinen pieni kohde (esimerkiksi kohteella tarvitaan vain yksi takymetrin asemapisti toteutusta varten) eikä ole olennaista sitoa kohdetta tarkasti valtakunnalliseen verkkoon, voidaan käyttää ohjeistuksena kauttaaltaan käyttö pisteiden tarkkuustasoa ja toimia paikallisessa koordinaatistossa.

Maatutkaluotaus ja referenssit maatutkaluotaukselle

- referenssipisteiden tarkkuusvaatimus N,E = +/- 1000 mm
- tarkkuusvaatimus: vähintään 1 GHz antenni
- suunnittelija määrittää mittalinjojen määrän, suositus: 3 mittauslinjaa / kaista
 - o mittaus poikkisuuntaan voi olla tarpeellinen, jos tietä on esimerkiksi levennetty tai pientareella on eri päällystepaksuus
 - o mittaus on aloitettava ja päätettävä tunnetuilta jakopisteiltä
- referenssiporanpalojen otossa ja päällysteen paksuuden mittauksessa huomioitava toimenpidehistoria ja näytteenottoa on tihennettävä muun muassa painumakohdissa
 - o suositus on tehdä kairaukset ja näytteenotot maatutkamittauksen jälkeen; ohjeellinen referenssipisteen väli maksimissaan 3 km
- suositus: maatutkaluotauksen tehnyt mittaja tekee myös datan tulinnan
- vaihtoehtoisena menetelmänä maatutkaluotaus voidaan korvata vain poranpalojen otolla, jos kohde on pieni. Tällöin poranpalapistien väli olisi syytä olla lyhyt, esimerkiksi 100 metriä
- tilaajalle luovutetaan XY ja delta-Z -tieto paalun lisäksi esimerkiksi Excel-formaatissa

PPL-mittaukset

- Kohteella voidaan suorittaa myös PPL-mittauksia kantavuuden varmistamiseksi
 - o suositus: suunnittelija ottaa kantaa tähän erikoiskysymykseen
- PPL-mittaukset suoritetaan voimassa olevien Liikenneviraston ohjeiden mukaisesti
- PPL-pisteiden tarkkuusvaatimus N,E = +/- 1000 mm

3.3 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan*

Mobiilikartoitus

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

Paitsi kohta laadunvarmistus

- Mobiililaserkeilauksen laadunvarmistus tulee tehdä keilausaineistojen sovitukseen käyttämättömien signaalipisteiden tai olemassa olevien maastokohteiden avulla erot raportoiden.

Maakeilaus tai pintamallin teettäminen vain maastomittauksin

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

”Mitattavat pisteet”

- signalointipisteet; mobiililaserkeilausdatan sovitukseen
 - tarkkuusvaatimus: RTK-GNSS-mittauksena. Mittaus suoritetaan vähintään 3 x 10 sekunnin havaintosarjoja, joiden tuloksista lasketaan keskiarvo ja keskihajonnat
 - data sovitetaan sisäisesti ja kohdekoordinaatistoon käyttämällä maapisteistöä
 - signalointia ei ole pakko merkitä maastoon, vaan voidaan käyttää jo olemassa olevia yksiselitteisiä maastokohteita kuten maalimerkintöjä
 - käytetään datan sisäiseen sovitukseen ja georeferointiin

Käyttöpisteitä ei välttämättä tarvita, mutta käytännössä kohteelle kannattaa perustaa käyttöpisteitä n. 1 km välein helposti saavutettavaan ja pysyvään paikkaan (sijoitettava toimenpiteiden ulkopuolelle). Käyttöpisteet voidaan mitata RTK-GNSS -mittauksena.

Maatutkaluotaus ja referenssit maatutkaluotaukselle

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

PPL-mittaukset

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

3.4 Opastava koneohjaus

Mobiilikartoitus

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

Paitsi kohta laadunvarmistus

- Mobiililaserkeilauksen laadunvarmistus tulee tehdä keilausaineistojen sovitukseen käyttämättömien signaalipisteiden tai olemassa olevien maastokohteiden avulla erot raportoiden.

* Teoreettiseen tarkasteluun pohjautuvat ohjeet, menetelmää ei ole vielä kokeiltu

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

Maakeilaus tai pintamallin teettäminen vain maastomittauksin

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

”Mitattavat pisteet”

- *Kuten automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan -menetelmässä*

Maatutkaluotaus ja referenssit maatutkaluotaukselle

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

PPL-mittaukset

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

4 SUUNNITTELU

4.1 Automaattinen 3D-koneohjaus

Suunnittelun tarvitsemat lähtötiedot

Suunnittelua varten tilaaja / mittaaja luovuttaa suunnittelijalle:

- kiintopisteiden tiedot; esimerkiksi ascii-formaatissa
- signalointipisteiden tarkemittaustiedot; esimerkiksi ascii-formaatissa
- mobiililaserkeilaus; LAS-formaatissa, raakadata tarvitaan suunnitteluun
- harvennettu hajapisteistö noin 10 cm riittää maatutkukseen
- maatutkadata (pääosin käy myös PPL-dataan ja tierakennekairauksiin, määriteltävä); esimerkiksi seuraavassa ascii-formaatissa (yksilöitävä jokaiselle mittalinjalle)
 - o aloituspaalu (tierekisteriosoite, oltava jakopisteellä)
 - o mittapaalu (tierekisteriosoite, 1m väli) ja päällysteen kokonaispaksuus (suhteellinen z)
 - o mitattu sijainti poikkisuunnassa (mittalinja, esimerkiksi oikea ajoura)
 - o lopetuspaalu (tierekisteriosoite, oltava jakopisteellä)
 - o koordinaatit, xy jokaiselle mittaushavainnoille (tarkkuusvaatimus)

Asfaltinlevittimen ja asfalttimassan asettamat rajoitukset suunnittelulle

Tasausmassan levityksessä on huomioitava, asfaltin levityksestä:

- levitystyö tehdään koneellisesti asfaltinlevittäjällä ja teiden ylläpito-hankkeissa käytävien asfaltinlevittäjän peräpalkit ovat tyypillisesti kiinniasennossa 3 metriä leveitä ja auki asennossa 6 metriä leveitä, joten asfaltinlevittäjällä on hankalaa levittää asfalttimassaa kapeammalle kuin 3 metrin levyiselle levityskaistalle
- pienemillä asfaltinlevittimillä (kuin mitä tienpäällä tyypillisesti käytetään) pystyy levittämään asfalttia jopa 80 cm levyisinä levityskaistoina, mutta näissä asfaltinlevittimissä ei tyypillisesti ole koneohjauslaitteistoja
- asfaltinlevittimellä pystyy levittämään asfalttimassaa myös syöttämällä sitä vain puolen peräpalkin leveydeltä. Tällä menetelmällä levittäminen rasittaa kuitenkin levittäjää huomattavasti enemmän kuin mitä perinteinen levittäminen
- tyypillinen asfalttimassan raekoko on 16 mm. Tämän vuoksi tasaustoimenpiteen olisi syytä suunnitella vähintään 2 cm paksuina.

Suositus: tasausmassan levitys suunnitellaan siten, että tasaus nousee koko kaistalla, vähintään 2 cm jokaisessa kohdassa poikkileikkauksella.

Suunnittelussa huomioitavia seikkoja

Seuraavat kohdat perustuvat vuosien 2012-2018 aikana saatuihin kokemuksiin:

- päällysteen paksuus saattaa vaihdella poikkileikkauksella; paksuus pientareella
- suuret tasauksenmuutokset voivat aiheuttaa luiskille uudelleenmuotoilutarpeita
- suuret tasauksenmuutokset voivat aiheuttaa kuivatuksellisia muutostarpeita (esimerkiksi ojan syventäminen)
- suuret tasauksenmuutokset voivat aiheuttaa kaiteiden muutostarpeita
- erityisalueet rajataan yleensä mallipohjaisen suunnittelun ulkopuolelle
 - o keskisaareke- ja muut alueet, joissa paljon pakkopisteitä tulee välttää
 - o siltojen osalta toimenpiteenä yleensä laatikkojyrsintä
- kantavuus ja stabiilitetti on huomioitava, nykyisen asfaltin jäljelle jäävä paksuus
- alikulkujen vapaa korkeus

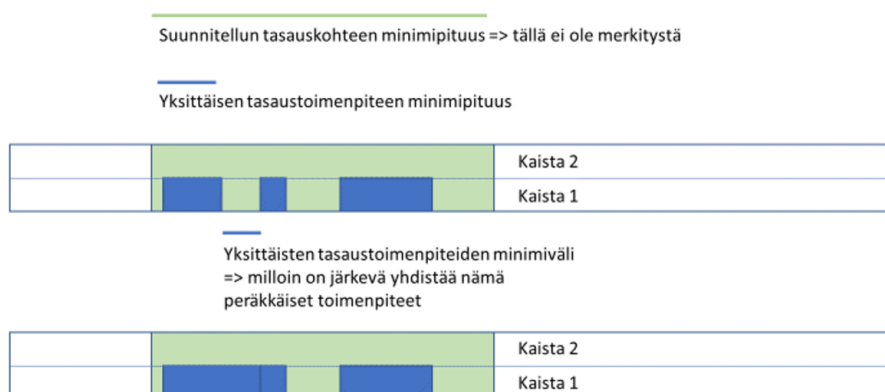
Suositusarvot toteutettaville tasauksille

Pinnat suunnitellaan jatkuvina pintoina. Suositusarvot tasaustoimenpiteille ja niiden väleille (kuva 4) ovat:

- yksittäisen tasaustoimenpiteen vähimmäispituus
 - o jyrsintä 0 m
 - o levitys 20 m
- yksittäisen tasaustoimenpiteen vähimmäisleveys
 - o jyrsintä 0 m
 - o levitys, pyritään tasaamaan koko kaista
- yksittäisen tasaustoimenpiteen minimiväli
 - o jyrsintä 0 m
 - o levitys 20 m
- yksittäisen tasaustoimenpiteen vähimmäispaksuus
 - o jyrsintä 0 cm
 - o levitys 2 cm

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko



kuva 4. suositukset toteutettaville tasauksille, käsitteet

Ohjearvo suunnitellun tasausalueen sovittamiselle olemassa olevaan tien pintaan: jos suunnittelija ei ole suunnitellut erikseen sovutusta, tasaus sovutetaan manuaalisesti siten, että pituuskallistuksen muutos on 2mm / 1m (10mm / 5m = 40mm / 20m = peruslähtöjyrkyyden pituus).

Suunnittelija luovuttaa tilaajalle:

- tietomalli (suunnitelma) CAD-formaatissa
 - o pintamalli
 - o taiteviivat
 - o vaakageometria paalulukemaa varten
- toteutusta havainnollistavat kuvat, esimerkiksi erokuvat
- muu tilaajan määrittämä aineisto

4.2 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan*

Kuten 3D-koneohjauksessa lukuun ottamatta seuraavia poikkeuksia

- Pituussuuntaiset geometriakorjaukset voidaan suunnitella korkeintaan noin 30 metriä pitkiksi
 - o Johtuu inertialaitteille (IMU) ominaisesta virheiden kumuloitumisesta ja sen aiheuttamaan ”ryömintään”
- Suunnittelija luovuttaa tilaajalle tietomallin levitettyinä osamalleina sekä erillisenä sivukaltevuusmallina

4.3 Opastava koneohjaus

Kuten 3D-koneohjauksessa lukuun ottamatta seuraavia poikkeuksia

- Pituussuuntaiset geometriakorjaukset voidaan suunnitella korkeintaan noin 30 metriä pitkiksi
 - o Johtuu inertialaitteille (IMU) ominaisesta virheiden kumuloitumisesta ja sen aiheuttamasta ”ryöminnästä”

* Teoreettiseen tarkasteluun pohjautuvat ohjeet, menetelmää ei ole vielä kokeiltu

5 PÄÄLLYSTEKORJAUKSEN LÄHTÖTIEDOT

5.1 Yleistä

Urakoitsija vastaa tietomallin (suunnitelman) kääntämisestä kyseille koneohjauslaitteistolle sopivaksi. Tilaa-
jan urakoitsijalle luovuttama aineisto riippuu valitusta toteutustavasta.

5.2 Automaattinen 3D koneohjaus

Tilaaaja luovuttaa urakoitsijalle urakkalaskentaa varten:

- tiedot lähtötietojen hankintaan käytetyistä menetelmistä
- tiedon valitusta tekniikasta: 3D-koneohjaus tai opastava koneohjaus
- arvioidut tasausmassamäärät ja tasausjyrsintämassa, paaluväleittäin ja kaistoittain
- jos kohteen suunnitelmat ovat jo valmistuneet, tilaaja luovuttaa lisäksi aineiston toteutusta varten (ks. lista alla)

Tilaaaja luovuttaa urakoitsijalle toteutusta varten:

- kiintopisteiden tiedot tekstitietona; esimerkiksi ascii-formaatissa
- signalointipisteiden tarkemittaustiedot tekstitietona; esimerkiksi ascii-formaatissa
- tietomalli (suunnitelma) LandXML / IM, CAD-formaatissa
 - o pintamalli
 - o taiteviivat
 - o vaakageometria paalulukemaa varten
- toteutusta havainnollistavat kuvat, esimerkiksi erokuvat
- suunnitellut tasausmassamäärät, paaluväleittäin

5.3 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan*

Tilaaaja luovuttaa urakoitsijalle urakkalaskentaa varten:

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

Tilaaaja luovuttaa urakoitsijalle toteutusta varten:

- tietomalli (suunnitelma)
 - o levitettyinä osamalleina
 - pintamalli
 - taiteviivat
 - o sivukaltevuuden toimitus erillisenä sivukaltevuusmallina
 - o vaakageometria paalulukemaa varten
- toteutusta havainnollistavat kuvat, esimerkiksi erokuvat
- suunnitellut tasausmassamäärät, paaluväleittäin

* Teoreettiseen tarkasteluun pohjautuvat ohjeet, menetelmää ei ole vielä kokeiltu

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

5.4 Opastava koneohjaus

Tilaaaja luovuttaa urakoitsijalle urakkalaskentaa varten:

- kuten automaattisen 3D-koneohjauksen kohdalla

Tilaaaja luovuttaa urakoitsijalle toteutusta varten:

- toteutussuunnitelman, jossa ilmenee
 - o 5 metrin välein tasaus- ja reunaviivojen suhteellinen korkeusmuutos
 - o 5 metrin välein suunniteltu sivukaltevuus
- toteutusta havainnollistavat kuvat, esimerkiksi erokuvat

6 PÄÄLLYSTEKORJAUKSEN TOTEUTUS

Urakoitsija suorittaa tasaustoimenpiteet (tasausjyrsintä, massatasaus) automaattisella 3D-koneohjauksella, **automaattisella koneohjauksella suhteessa tien pintaan*** tai opastavalla koneohjauksella. Varsinainen päällystelaatta levitetään vakiopaksuisena ilman koneohjausta.

Tilaaja voi erikseen vaatia myös päällystelaatan levittämistä 3D-koneohjauksella. Jos lopullinen laatta levitetään 3D-koneohjauksella, on suositeltavaa keskustella asetetuista vaatimuksista välillä absoluuttinen korkeusasema ja laatan paksuus:

- 3D-koneohjauksella toteutetun laatan paksuus vaihtelee varmuudella jonkin verran
 - o jos tasauskerros on ns. kova, jää 3D-koneohjauksella levitetty laatta (toteutettaessa suunnitelman mukaan) liian ohueksi
 - o jos tasauskerros on ns. alla, tulee 3D-koneohjauksella levitettyyn laattaa ylikulutusta massamäärään
 - o jos kohteelle on asennuttu esimerkiksi reunakivi, kivinäkymä tulee vaihtelevaan

Urakoitsijan vastaa siitä, että käytettävät laitteistot ovat kalibroitu laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti.

Urakoitsija vastaa signalointipisteiden z-koordinaattien tarkistusmittauksista hyvissä ajoin ennen kohteen korjausta. Tekniikkavaatimus: vähintään yhtä tarkka tekniikka kuin millä signalointipisteet on mitattu. Urakoitsijan on raportoitava tilaajalle viipymättä tarkistusmittausten tulokset.

Urakoitsija tarkistaa runko-, signalointi- ja käyttöpisteiden määrän riittävyyden toteutusta varten ja tekee tarvittaessa suunnitelman lisäkäyttöpisteiden tekemisestä. Tekniikkavaatimus: vähintään yhtä tarkka tekniikka kuin millä signalointipisteet on mitattu. Urakoitsijan on raportoitava tilaajalle viipymättä tarkistusmittausten tulokset.

Urakoitsijan on huomioitava, että signalointipisteet katoavat ensimmäisen tasaustoimenpiteen yhteydessä (ensimmäinen toimenpide on yleensä tasausjyrsintä).

Suositus:

- Urakoitsija vastaa massatasauspaaluvälien merkitsemisestä maastoon siten että yli 2 cm massatasausausta vaativat kohteet tulee merkittyä vähintään 10 metriä ennen ja jälkeen tasaustarvetta.
- Urakoitsija voi myös merkata tasausjyrsintäkohteet maastoon, mikä on suotavaa, jos kohteita on harvakseltaan

Ohje:

- signalointipisteiden z-koordinaattien tarkistusmittaus on suoritettava vähintään 3kk ennen työn suunniteltua toteutusta

* Teoreettiseen tarkasteluun pohjautuvat ohjeet, menetelmää ei ole vielä kokeiltu

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

- jos signalointipisteiden z-koordinaattien tarkistusmittauksessa havaitaan yli 30mm eroja lähtötietomittaukseen nähden, on tilaajan pohdittava kohteen uudelleensuunnittelutarvetta.

7 MÄÄRIEN TODENTAMINEN JA TILAAJALLE LUOVUTETTAVA AINEISTO

7.1 Määrien todentaminen

Suositukset määrien todentamiselle:

- Toteutunut tasausjyrsintämäärä (m²) = suunniteltu tasausjyrsintämäärä (m²) eli urakoitsija laskuttaa tasausjyrsinnän suunniteltujen tasausjyrsintäneliöiden mukaan.
- Urakoitsija laskuttaa massatasauksen toteutuneiden tonnimäärien mukaan
 - Urakoitsijan on viipymättä oltava yhteydessä tilaajaan, jos toteutuneet määrät alkavat poiketa suunnitelluista määristä

7.2 Tilaajalle luovutettava aineisto

Ellei urakka-asiakirjoissa muuta mainita, noudatetaan Liikenneviraston ohjetta Päällysteiden korjaustoimenpiteistä kerättävä ja raportoitava tieto (ohje valmistuu vuoden 2018 aikana).

8 LAADUNHALLINTA JA LAATUVAATIMUKSET

8.1 Yleistä

Urakoitsija vastaa laadunhallintamittauksista

8.2 Automaattinen 3D koneohjaus

- korkeusasema keskilinjalta
 - o tilaaja asettaa vaatimuksen mittaustiheydelle; suositus: 5-20 metriä kohteesta riippuen
 - o tekniikkavaatimus: vähintään yhtä tarkka tekniikka kuin millä signalointipisteet on mitattu
 - o tilaaja asettaa tarvittaessa laatuvaatimuksen toteumalle; suositus: +-20mm
- sivukaltevuus
 - o raakadatasta tehtävä tulostustiheys 5 metriä
 - o tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5209)
 - o laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen
- IRI / IRI4
 - o raakadatasta tehtävä tulostustiheys 10 metriä ja 100m
 - o tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5207)
 - o laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen

8.3 Automaattinen koneohjaus suhteessa tien pintaan*

- korkeusasema keskilinjalta
 - o mittatiheys on suunnitelmapisteiden väli
 - o tekniikkavaatimus: rullamitta
 - o tilaaja asettaa tarvittaessa laatuvaatimuksen toteumalle; suositus: +-20mm
- sivukaltevuus
 - o raakadatasta tehtävä tulostustiheys 5 metriä
 - o tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5209)
 - o laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen
- IRI / IRI4
 - o raakadatasta tehtävä tulostustiheys 10 metriä ja 100m
 - o tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5207)
 - o laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen

8.4 Opastava koneohjaus

- korkeusasema keskilinjalta
 - o mittatiheys on suunnitelmapisteiden väli
 - o tekniikkavaatimus: rullamitta
 - o tilaaja asettaa tarvittaessa laatuvaatimuksen toteumalle; suositus: +-20mm
- sivukaltevuus

* Teoreettiseen tarkasteluun pohjautuvat ohjeet, menetelmää ei ole vielä kokeiltu

YIV 11.2

Marttinen Manu; Ailisto Mikko

- raakadatasta tehtävä tulostustiheys 5 metriä
- tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5209)
- laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen
- IRI / IRI4
 - raakadatasta tehtävä tulostustiheys 10 metriä ja 100m
 - tekniikkavaatimus: PTM (PANK-5207)
 - laatuvaatimus toteumalle: voimassaolevien asfalttinormien mukainen

Tarvittaessa edellä mainitut mittaukset voidaan korvata laserkeilauksella. Tilaaja voi asettaa vaatimuksen valmiin kohteen keilaukselle urakka-asiakirjoissa.